



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

ELECTRIFICACIÓ DE LES XARXES D'AUTOBÚS. MODEL DE GESTIÓ DE LA RECÀRREGA

Treball realitzat per:

Guillermo Solina Llibre

Dirigit per:

Miquel Estrada Romeu

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona,

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

ELECTRIFICACIÓ DE LES XARXES D'AUTOBUS. MODEL DE GESTIÓ DE LA RECÀRREGA

Autor: Guillermo Solina Llibre

Tutor: Miquel Estrada Romeu

RESUM

PARAULES CLAU: Tecnologies dels vehicles elèctrics, Capacitat de la bateria, Recàrrega a cotxera, Recàrrega al carrer.

El canvi climàtic és un dels temes més preocupants al món i al qual s'ha de fer alguna cosa per reduir-ho. El transport públic és un element de ciutat molt important en relació a la mobilitat a les ciutats, i el servei d'autobús és un gran emissor de diòxid de carboni a l'atmosfera. Al contrari que el tren, el metro o el tram, l'electrificació dels autobusos ha de ser l'objectiu principal dels governs i empreses en relació a la mobilitat, per poder garantir aquesta millora a favor del medi ambient. L'objectiu d'aquest treball és realitzar un anàlisi per estudiar la viabilitat tècnica i econòmica de diferents esquemes de recàrrega. Abans, però, s'estudien les principals tecnologies sense les quals no seria possible realitzar aquestes xarxes elèctriques. Finalment, s'aplicaran els models estudiats a dues xarxes reals de Barcelona i es faran diferents anàlisis de sensibilitat.

ELECTRIFICACIÓN DE LAS REDES DE AUTOBUS. MODELO DE GESTION DE LA RECARGA

Autor: Guillermo Solina Llibre

Tutor: Miquel Estrada Romeu

RESUMEN

PALABRAS CLAVE: Tecnologías de los vehículos eléctricos, Capacidad de la batería, Recarga en la cochera, Recarga en la calle.

El cambio climático es uno de los temas más preocupantes en el planeta y en el cual hay que hacer algo para intentar reducirlo. El transporte público es un elemento muy importante en relación a la movilidad en la ciudad, y el servicio de autobús es un gran emisor de dióxido de carbono a la atmósfera. Al contrario que el tren, metro o tranvía, la electrificación de las redes de buses tiene que ser el objetivo principal de los gobiernos y empresas en relación a la movilidad, para poder garantizar esta mejora a favor del medio ambiente. El objetivo de este trabajo es realizar un análisis para estudiar la viabilidad técnica y económica de los diferentes esquemas de recarga. Antes, se estudiarán las principales tecnologías sin las cuales no sería posible realizar este tipo de redes eléctricas. Finalmente, se aplicarán los modelos estudiados a dos redes reales de Barcelona y se realizarán diferentes análisis de sensibilidad.

THE ELECTRIFICATION OF PUBLIC TRANSPORT BUS NETWORKS. MODEL OF THE DIFFERENT CHARGING SCHEMES

Author: Guillermo Solina Llibre

Tutor: Miquel Estrada Romeu

ABSTRACT

KEY WORDS: Electric vehicle technologies, Battery capacity, Overnight charging, Opportunity charging.

Climate change is one of the most worrying issues in the world and something has to be done to reduce it. Public transport is a very important city element in relation to mobility in cities, and the bus service is a great emitter of carbon dioxide in the atmosphere. Unlike the train, subway or tram, the electrification of buses must be the main objective of governments and companies in relation to mobility, in order to guarantee this improvement in favor of the environment. The objective of this work is to carry out an analysis to study the technical and economic viability of different charging schemes. But before, the main technologies are studied without which these electrical networks would not be possible. Finally, the models studied in two real networks of Barcelona will be applied and different sensitivity analyzes will be made.

ÍNDEX

1.	INTRODUCCIÓ.....	1
2.	OBJECTIUS	2
3.	ESTUDI DE LES TECNOLOGIES DELS VEHICLES ELÈCTRICS	3
3.1.	Contextualització.....	3
3.2.	Bateries	3
3.3.	Tipus de recàrrega.....	6
3.4.	Tipus de vehicles	9
3.4.1.	Irizar	9
3.4.2.	Solaris	10
3.4.3.	BYD	11
3.5.	Planificació estratègica de serveis elèctrics	11
3.6.	Estratègies de control	12
4.	METODOLOGIA.....	14
4.1.	Notació i formulació del problema	14
4.2.	Models de recàrrega	17
4.3.	Model A: recarrega durant el dia a cotxera	18
4.3.1.	Operacions de càrrega a cotxera durant el període <i>hDAY</i>	18
4.3.2.	Operacions de càrrega durant la nit a cotxera	22
4.3.3.	Nombre de carregadors necessaris.....	23
4.4.	Model B: recàrrega a carrer (opportunity charging).....	25
4.4.1.	Tipus B1. Operació de càrrega a cada viatge d'anada i tornada	25
5.	ANÀLISI DE COSTOS	28
6.	MODELITZACIÓ D'UNA XARXA DE BUS	29
6.1.	Xarxa de bus elèctrica, Model A.....	30
6.2.	Xarxa de bus elèctrica, Model B.....	32
6.2.1.	Configuració N-0.....	33
6.2.2.	Configuració N-N	34
6.3.	Xarxa de bus dièsel.....	35
7.	APLICACIÓ A LES LÍNIES H16 I V13 DE BARCELONA	38
7.1.	Línia H16.....	39
7.1.1.	Resultats reals	40
7.1.2.	Anàlisi de sensibilitat de les diferents capacitats de les bateries per el model A	41
7.1.3.	Anàlisi de sensibilitat de les diferents capacitats de les bateries per el model B	45
7.1.4.	Xarxa de bus dièsel.....	48

7.1.5.	Comparativa	48
7.1.6.	Anàlisi de sensibilitat en relació a la distancia del carregador en carrer	49
7.1.7.	Anàlisi de sensibilitat de la reducció del preu d'adquisició dels vehicles elèctrics	49
7.2.	Línia V13	51
7.2.1.	Resultats.....	53
7.2.2.	Anàlisi de sensibilitat de les diferents capacitats de les bateries per el model A	53
7.2.3.	Anàlisi de sensibilitat de les diferents capacitats de les bateries per el model B	55
7.2.4.	Xarxa de bus dièsel.....	58
7.2.5.	Comparativa	58
7.2.6.	Anàlisi de sensibilitat en relació a la distancia del carregador en carrer	58
7.2.7.	Anàlisi de sensibilitat de la reducció del preu d'adquisició dels vehicles elèctrics	60
8.	CONCLUSIONS	61
9.	FUTURES VIES D'INVESTIGACIÓ	63
10.	REFERÈNCIES	64
11.	ANNEX	65

1. INTRODUCCIÓ

Els models de transports massius són l'element clau per garantir la mobilitat eficient a les grans ciutats, permetent una reducció de l'ús dels vehicles privats. Les xarxes de bus tenen una enorme flexibilitat degut a la utilització mínima d'infraestructura i la mida del vehicle. Però, al contrari que el tramvia o el metro o ferrocarril, l'electrificació encara està pendent. La gran majoria dels serveis de bus es duen a terme amb els ICE (*internal combustion engine*), busos dièsel o híbrids, que encara són responsables d'una gran emissió de contaminants al medi ambient.

La implementació dels busos elèctrics (BEB) contribuirà a la reducció del consum de combustibles fòssils, l'emissió de CO_2 a l'atmosfera i la contaminació local de l'aire, mitjançant la millora de l'eficiència energètica (Miles and Potter, 2014, and Zhou et al. 2016)

El nombre de busos elèctrics en l'actualitat s'està expandint ràpidament, la flota mundial dels busos s'ha duplicat en un sol any al 2015 (IEA, 2017), però encara, no hi ha unes xarxes completament elèctriques, excepte a la Xina. Actualment existeixen diferents projectes europeus per intentar accelerar el procés d'implementació d'aquestes xarxes de busos elèctrics a Europa.

Autobusos amb bateries elèctriques (BEB), és la tipologia de vehicle elèctric més desafiant. Tradicionalment els BEB's poden ser recarregats amb dos esquemes diferents, recarrega en carrer o a cotxera, ràpida o lenta, respectivament, i presenten uns diferents temps de càrrega (Miles and Potter, 2014). La mida de la bateria en el sistema de recàrrega en carrer és més petita que la de recàrrega en cotxera.

Malgrat el prometedor efecte sobre el medi ambient i la recent millora al temps de recàrrega i capacitats, el cost total de l'operador, el pes de les bateries i els nous requeriments operacionals, són els majors factors que limiten l'eficiència dels BEB's (Li and JQ, 2014).

Encara que el BEB pot reduir el cost de funcionament fins a un 80% comparat als ICE, el cost capital i el cost de la infraestructura és molt més elevat.

2. OBJECTIUS

Aquest treball es planteja un objectiu principal: realitzar un anàlisi de les xarxes d'autobús elèctrics per valorar la seva viabilitat tècnica i econòmica.

Els objectius secundaris que emanen del principal són:

- Descripció de les xarxes de bus elèctrics i els seus principals elements.
- Proveir un model operatiu que calcula els recursos, costos i prestacions per diferents esquemes de recàrrega elèctrica al llarg d'un dia.
- Estudiar un cas aplicat a dues xarxes de Barcelona.
- Comparació dels BEB amb altres tecnologies, dièsel.
- Valorar els resultats obtinguts i identificar palanques de maniobra en el disseny i operació d'aquests sistemes.

3. ESTUDI DE LES TECNOLOGIES DELS VEHICLES ELÈCTRICS

3.1. Contextualització

El primer tipus de bus elèctric que es va crear va ser el troleibús que és com un tramvia, però en comptes d'anar per rails, té pneumàtics. Funciona amb una catenària amb la qual fa contacte per tenir electricitat (Trolebús | Què es, característiques, parts, cómo funciona, para qué sirve s.d.). Aquesta tecnologia està obsoleta ja que estèticament, tenir una catenària per tota la ciutat no és acceptat i es necessitaria fer una infraestructura enorme per poder circular a les línies de Barcelona. Els troleibús van desaparèixer de Barcelona al 1968 (RED DE TROLEBUSES DE BARCELONA. s.d.)

Els següents dos tipus de bus són els busos amb pila d'hidrogen i els de metà. Aquests dos tipus de bus tampoc s'utilitzen, en el primer dels casos, el d'hidrogen, es necessita un elements de seguretat enorme, ja que té un comportament explosiu molt perillós. Encara s'ha d'estudiar aquest material com a combustible. El següent cas, el bus de metà, està ja obsolet, ja que encara que tingui una contaminació inferior als de gasolina, no és un bus de contaminació zero, com el elèctric.

Per últim, els busos híbrids, són els més utilitzats en l'actualitat, però, no són de contaminació zero. Per tant la seva vida s'està esgotant, ja que tot va encaminat a poder proporcionar un servei de busos de zero emissions. Per tant la tecnologia que s'estudiarà en aquest treball és la dels busos 100% elèctrics.

3.2. Bateries

(Zeeus 2018) És un dels temes pendent de desenvolupament ja que encara no s'ha trobat la solució idònia. El tipus de bateria que s'utilitza és l'ió de liti. El punt d'estudi principal d'aquest tipus de bateria és el seu cicle de vida, ja que és el principal problema de les bateries. Qualsevol element alhora de dissenyar les bateries afectaran al seu temps de vida. En el primer punt del disseny, s'haurà d'escollir el material per les bateries de ió de liti, diferenciarem els materials pel càtode i l'ànode. En les taules 1 i 2 podrem veure els diferents materials i els seus avantatges i inconvenients.

Taula 1: Materials pel càtode

Material	Avantatges	Inconvenients
<i>LiCoO₂</i>	Bon temps de vida	Molt poc segura
<i>LiNiO₂</i>	Bon rendiment	La menys segura
<i>LiMn₂O₄</i>	Seguretat correcte	Pobre temps de vida
<i>LiFePO₄</i>	Barat i segur	

Taula 2: Materials per l'ànode

Material	Avantatges	Inconvenients
Hard carbon LiC_6		Poc numero de cicles complets
Graphit LiC_6	Nombre elevat de cicles	Molt car
Titanate $Li_4Ti_5O_{12}$	Segur	Baixa densitat d'energia
Silicon $Li_{22}Si_6$	Alta densitat d'energia	

El següent element en el disseny de bateries és decidir la forma de les mateixes. Tindrem 3 formes diferents de bateries: cilíndriques, *pouch-bag cells* o prismàtiques.

- i) Cilíndriques: tenen un llarg període de vida però és molt complicat el seu refredament.



Figura 1: Bateries cilíndriques

Font: Google imatges

- ii) *Pouch-bag cells*: el refredament es bo i alta densitat energètica.

Figura 2: *Pouch-bag cells*

Font: Google imatges

- iii) Prismàtiques: hi ha una alta densitat energètica en els packs de bateries, combinació de bateries cilíndriques i *pouch-bags*.



Figura 3: Bateries prismàtiques

Font: Google imatges

Un cop decidit com seran les cel·les de les bateries, el següent pas és intentar augmentar el temps de vida.

El primer problema que ens trobem, és la temperatura. Quan més elevada és la temperatura a la qual treballen les bateries, més curt són els seus cicles. Per intentar mitigar aquesta problemàtica, s'han d'instal·lar sistemes de refredament. De menys a més eficients i cars, tenim, refrigeració per aire, refrigeració per aigua i refrigeració líquida.

S'haurà de decidir, també, la connexió de les cel·les. Existeixen els següents tipus de connexió per les cèl·lules:

- i) Connexió en sèrie: alt voltatge i no redundància.
- ii) Cadenes modulars individuals: baix voltatge, alta redundància i molta flexibilitat en el tipus i edat de les cèl·lules.
- iii) *String-wise parallel connection*: alt voltatge, alta redundància i poca interacció amb les cèl·lules defectuoses.
- iv) Connexió paral·lela a nivell cel·lular: baix voltatge, alta redundància.

El sistema amb un voltatge baix milloren la seguretat, el maneig, la fiabilitat i el temps de vida.

L'envelliment de les bateries, és a dir, el temps de vida, depèn, també, de les carregues i la gestió de l'ús (Vilppu i Markkula 2015). Els principals factors que afecten són la temperatura, el estat de càrrega durant el cicle i durant el l'emmagatzematge, el corrent durant la càrrega i la durada del cicle.

La temperatura, com s'ha explicat anteriorment, és un dels principals problema en aquest tema. L'estat de càrrega té un impacte molt important, ja que si s'opera amb el 100% de la càrrega, el temps de vida es redueix a la meitat.

Per optimitzar la gestió de les bateries s'haurà de fer una càrrega completa només si és estrictament necessari i recarregar depenent del estat actual de càrrega i de la predicció de demanda.

Akasol (High Performance Batteries | AKASOL - Battery Systems s.d.), una empresa alemanya pionera en el desenvolupament de bateries per l'electromobilitat ha desenvolupat uns sistemes nous. Es tracta d'un sistema de bateries d'alta energia que utilitza unes noves cèl·lules cilíndriques dins de uns mòduls (AKM CYC Module) amb una densitat energètica molt elevada. Els mòduls van muntats sobre una estructura robusta. Aquest nou tipus de tecnologia permetrà augmentar el rang dels vehicles un 60 per cent. És un sistema segur, fiable i durador.

Com a principal novetat, aquestes bateries tenen un sistema de refredament líquid. Això provoca que tingui un llarg període de servei degut a la gestió de la temperatura. També hi ha una reducció volumètrica ja que es redueix el problema del sobreescalfament.

Apart, altres característiques importants són les següents. Com el sistema està basat en mòduls, es pot escalar a les necessitats del vehicle. Té la capacitat de recarrega ràpida i té una densitat energètica pionera al mercat.



Figura 4: AKM CYC

Font: Akasol

3.3. Tipus de recàrrega

Abans de parlar sobre els diferents tipus de línies de busos elèctrics que es poden realitzar, s'ha de parlar de les diferents connexions per la càrrega. Hi ha sis tipus de connexions:

- i) Pantògraf descendent (The European electric bus market is charging ahead, but how will it develop? | McKinsey s.d.): la connexió funciona via WIFI. Com el sistema no va instal·lat al bus, aquests tenen un pes inferior i tenen una alçada menor. El cost d'instal·lació no és tan elevat perquè no ho has d'instal·lar a tots els busos. Però si un pantògraf està fora de servei hi ha la possibilitat que els busos es quedin fora de servei també.

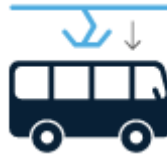


Figura 5: Pantògraf descendent

Font: McKinsey s.d.

- ii) Pantògraf ascendent (The European electric bus market is charging ahead, but how will it develop? | McKinsey s.d.): no es necessita connexió WIFI, ja que és el mateix conductor qui inicia la carrega. Els costos d'instal·lació són més elevats, perquè hi ha un sistema per cada bus. Però si un pantògraf es queda fora de servei, només un bus deixa de funcionar.



Figura 6: Pantògraf ascendent

Font: McKinsey s.d.

- iii) Connexió lateral: té un funcionament similar als pantògrafs, però amb un altre mecanisme que no es tant eficient com pantògraf.



Figura 7: Connexió lateral

Font: ZeEUS

- iv) Connexió via endoll manual: és la carrega habitual que s'utilitza a cotxera, ja que és un tipus de recarrega lenta.



Figura 8: Connexió via endoll manual

Font: ZeEUS

- v) Catenària: funcionament com al tram, recarrega constant sobre el bus mitjançant els cables superiors.



Figura 9: Catenària

Font: ZeEUS

vi) Canvi de bateria: un cop la bateria en ús s'està a punt d'esgotar, es canvia.



Figura 10: Canvi de bateria

Font: ZeEUS

Les més eficients i les que més s'utilitzaran són el pantògraf descendent i ascendent per la recarrega ràpida i connexió via endoll manual per la recàrrega lenta.

Existeixen 4 diferents tipus de línies elèctriques que depèn del mètode de carrega. En aquest treball s'estudiaran 2 dels 4 tipus de línia. Dins de cada grup es pot desenvolupar de diferents maneres. (Zeeus 2018)

- i) En carrer, parades intermèdies: el problema principal es que s'ha de fer una inversió en infraestructura molt elevada, ja que les carregues podrien ser, fins i tot, a cada parada. Les bateries dels busos per aquest tipus de càrrega serien petites per què no necessitarien molta capacitat, ja que es carrega constantment, això si, haurien d'estar dotades de recàrrega ràpida, ja que s'haurien de carregar en el temps de baixada i pujada dels passatgers. Només seria possible amb super condensadors . Aquest tipus de procediment no serà estudiat.
- ii) En carrer, capçaleres (*opportunity charging*): es poden dissenyar línies de bus amb recarregues a cada capçalera (inici i final) o només a una capçalera (inici o final). Els avantatges e inconvenients són els següents:
 - a. Avantatges: s'hauran d'instal·lar uns sistemes de bateries relativament lleugers i petits, ja que el trajecte serà de capçalera a capçalera. Aquests sistemes evitaran perdre capacitat pels passatgers i tindran una vida útil bastant elevada. Hauran de tenir capacitat de recarrega ràpida i per això seran de capacitat petita.
Si s'utilitza aquest tipus de xarxa, els busos es poden utilitzar en diferents línies, mentre siguin semblants. Això provoca que no hagi de tenir un flota de busos excessivament gran.
 - b. Inconvenients: s'ha de fer inversió en infraestructura, no tan elevada com en el cas de parades intermèdies i no només en els carregadors al carrer, sinó també amb la flota de bus. El costos de manteniment també seran elevats. Les bateries tindran una baixa densitat energètica.

La connexió que s'utilitzaria en aquest cas seria el pantògraf descendent o ascendent.



Figura 11: Recàrrega en carrer

Font: ZeEUS

iii) A cotxera (*day and overnight charging*): les línies de bus serien semblants a les línies de bus actuals, ja que el sistema de càrrega és com el dels ICE, recarregar les bateries o emplenar el dipòsit. Els avantatges e inconvenients són els següents:

- a. Avantatges: el cost d'infraestructura és casi nul, ja que només s'han d'instal·lar carregadors a cotxera.
- b. Inconvenients: els sistemes de bateries seran grans i pesats, i reduiran la capacitat de passatgers al bus. Tindran uns cicles de vida breu, menys de 1000 cicles complets. S'hauran de dissenyar els busos i les bateries per cada línia de bus, ja que si col·loques un bus amb una capacitat més elevada que la necessària per una línia es perden diners i eficiència, i si col·loques un bus amb una capacitat inferior que la requerida a la línia, no podrà realitzar el total del servei. Per tant, el nombre de busos per la flota haurà de ser més gran.

La recàrrega, com s'ha dit, es realitza a cotxera durant el dia o la nit, per tant s'han de tenir, carregadors ràpids i lents, ja que s'ha de recarregar ràpid quan es durant el dia, i recarregar lent durant la nit, de 3 a 6 hores. La connexió per la recarrega utilitzada en aquest casos és mitjançant endoll manual (lenta) i pantògrafs (ràpida).

iv) Catenària: el cost d'infraestructura és massa elevat.

3.4. Tipus de vehicles

En aquest apartat, es parlarà sobre 3 empreses diferents, les quals han desenvolupat vehicles elèctrics d'alta ocupació.

3.4.1. Irizar

(ie bus - Irizar e-mobility s.d.) Irizar és un grup empresarial, d'origen espanyol, amb presència internacional, que concentra la seva activitat en els sectors de transport de passatgers, electromobilitat, electrònica, etc.

Han desenvolupat un línia de busos 100% elèctrics, anomenats, Irizar ie bus. Està dissenyat per aconseguir la major eficiència energètica i autonomia del vehicle possible. Avui dia el model de 12 metres circula a ple rendiment per diferents ciutats europees.

La línia Irizar ie bus té dissenyats 4 diferents busos, de 10.8, 12, 15 i 18 metres. Les bateries utilitzades per tots els vehicles són de ió liti i de diferents potències. Pels dos primer busos, la potència de les bateries és de 180 kW, pels dos següents, és de 235 kW.

Tots els busos tenen la possibilitat de recàrrega lenta, ràpida i ultra-ràpida. El temps estimat de càrrega lenta és de 3-4 hores i el de càrrega ràpida de 5 minuts, amb els pantògrafs.



Figura 12: Irizar ie 12

Font: Irizar E-mobility s.d.

3.4.2. Solaris

(Solaris Bus Ibérica, S.L s.d.) Solaris Bus & Coach S.A. és un fabricant europeu de vehicles molt innovadors d'alta ocupació. El nou Solaris Urbino 12 elèctric ha estat premiat amb el premi "Bus of the Year 2017". Aquesta empresa ha desenvolupat 3 vehicles completament elèctrics, Urbino 8.9 LE elèctric, Urbino 12 elèctric i Urbino 18 elèctric. Les bateries són, en els 3 casos, d'ió liti.

Els busos Urbino 8.9 LE elèctric i Urbino 12 tenen una potència de 160 kW i poden ser carregats manualment, amb endoll, o amb el sistema dels pantògrafs. En canvi, l'últim dels casos, l'Urbino 18, té una bateria amb una potència de 240 kW i la manera de recarregar-lo és la mateixa, endoll o pantògraf.



Figura 13: Urbino 18

Font: Solaris Bus Ibérica, S.L

A la figura 13, podem veure el sistema de recàrrega, que és amb un pantògraf ascendent .

3.4.3. BYD

(BYD Eléctricos s.d.) BYD és una companyia pionera global, d'origen xinès. Té al mercat dos busos elèctrics, eBus Andino-12 i eBus Andino-18. Com a característiques comunes, aquests busos funcionen amb unes bateries amb tecnologia de ferro fosfat desenvolupades per BYD, els motors van acollats a les rodes, tenen una regeneració de carga a través del frenat i desacceleració i tenen un sistema de recàrrega ràpida de 2 i 2,5-3 hores, respectivament.

La capacitat de les bateries són de 325 kWh pel de 12 metres i 400 kWh pel de 18 metres. L'autonomia dels dos busos és de 350 km per cada cicle de carga en condicions reals de servei.



Figura 14: eBus Andino-18

Font: BYD Electricos s.d.

3.5. Planificació estratègica de serveis elèctrics

(Prof i Tuyet 2003) El primer pas és dissenyar la xarxa de bus elèctrica. Per fer-ho s'han de tenir en compte diferents grups interessats:

- i) Rendiment dels usuaris: cobertura temporal, cobertura espacial, velocitat i confort, fiabilitat e integració amb altres modes.
- ii) Cost de l'agència i autoritats:
 - a. Cost fix: nombre de busos a la flota, grandària dels vehicles i longitud de la línia
 - b. Cost variable: distancia recorreguda per dia i dietes dels conductors.
- iii) Societat: externalitats

Les xarxes de bus que es tenen en compte són: radial (Newell, 1979), reixa (Holroyd, 1965) i híbrida (Daganzo, 2010). El procediment a seguir té dos passos, dissenyar els conceptes i a posteriori, fer un pla detallat.

L'objectiu del problema és minimitzar els costos, la formulació serà explicada més endavant.

3.6. Estratègies de control

(Prof i Tuyet 2003) Quan es planifica una línia de bus, s'han de tenir en compte que poden existir desordres que provoquen arribades irregulars a les parades de bus, temps de recorreguts inestables i més temps d'espera pels usuaris, degut principalment, al transit. Aquests desordres poden provocar un problema anomenat *bus bunching*, quan hi ha una acumulació de busos.

Per intentar evitar aquest problema, s'han desenvolupat diferent tipus d'estratègies per controlar-ho. Hi ha 3 estratègies que actualment estan en ús.

La primera és la més senzilla i la que no requereix tecnologia. Consisteix en posar uns temps d'espera a les parades, normalment a les de final de trajecte per intentar normalitzar els temps de recorregut dels busos. És a dir, si un bus fa el recorregut més ràpid del previst, en arribar a la última parada, haurà de esperar un temps establert prèviament. Els principal inconvenient d'aquesta metodologia és que és un procés estàtic i poc útil davant de grans desordres. L'altre inconvenient és que si un bus fa un temps d'espera improductiu, el cicle de bus augmenta de manera ineficient.

La següent metodologia requereix de tecnologia i comunicació entre busos. Es tracta del control dinàmic de la velocitat dels busos. El vehicles d'una mateixa línia es mouen a diferents velocitats depenent del temps de recorregut que han de fer. És a dir, si un vehicle està acostant-se al bus de davant, reduirà la velocitat per no crear el *bus bunching*. I per contra, si un bus està més lluny de lo previst al de davant, haurà d'accelerar. L'avantatge és que és mètode que s'adapta i és en temps real. I l'inconvenient és que els busos aniran a un a velocitat inferior.



Figura 15: Comparació entre regularitat i velocitat (Daganzo, 2009)

Font: ZeEUS

L'últim mètode de control, és el segon mètode sumant un sistema de prioritat de semàfors. És a dir, que hi hagi uns semàfors que quan arribin busos que circulin amb retard és posin verds. Els avantatges són que és un mètode flexible i aplicable en temps real i que amb aquestes mesures no es redueix tant la velocitat dels busos. L'inconvenient i alhora dificultat principal és que s'ha de coordinar el tràfic normal, automòbils particulars, i el bus.

4. METODOLOGIA

La metodologia que es seguirà per fer l'anàlisi de l'electrificació de les xarxes de bus es basa en la modelització mitjançant aproximacions contínues de la utilització dels recursos de la línia (Estrada et al, 2019).

4.1. Notació i formulació del problema

El nou servei de busos elèctrics, provoquen uns nous continguts que ens porten a nous esquemes operatius i desplegament de recursos. A continuació es definiran algunes assumpcions per l'aproximació del model.

- Configuració de la ruta del bus.

Considerem la ruta com una línia recta de llargària $2L$, on els busos van en les dues direccions i hi ha aturades a una distància s . Els autobusos poden ser introduïts des dels dos extrems de la xarxa. Establim que la distància des de la última parada fins a la cotxera està situada a l_g unitats de distància. Quan els vehicles deixen d'estar en servei, recorreran aquesta distància l_g fins arribar a cotxera on seran aparcats. A cotxera disposarem de carregadors de recarrega ràpida i lenta. A més, en cas de necessitat, disposarem de dos carregadors ràpids en carrer situats a l_a i l_b unitats de distància de la última parada en cada direcció. El cas òptim és quan els carregadors estan situats a la última parada ($l_a = l_b = 0$) però no sempre es possible.

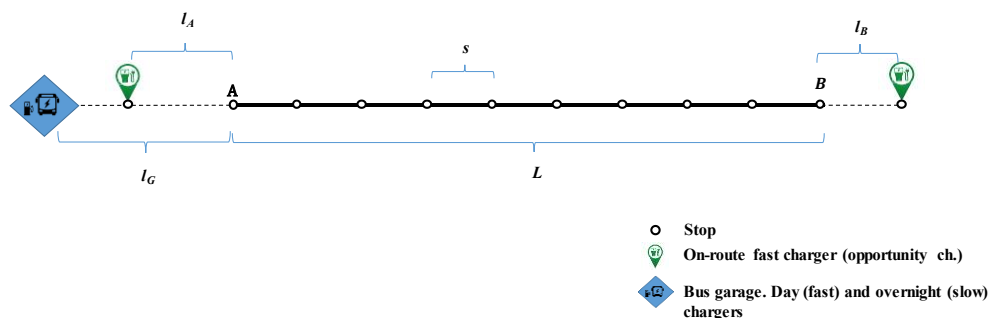


Figura 16: Configuració de la ruta del bus

Font: ZeEUS

- Finestra horària estacionària i flota necessària.

S'assumeix que el servei de bus ha de ser proporcionat durant h_{DAY} hores, on N són els períodes estacionaris o finestres temporals de llargària h_i , on $i = 1 \dots N$. Les variables de la demanda horària Λ_i i velocitat de comercial v_i es mantenen constants durant cada període $i = 1 \dots N$. El operador del bus determina la constant de temps de recorregut H_i per cada finestra temporal, considerant la demanda i el nivell de servei desitjat. D'una manera semblant a Daganzo (2010) i Estrada (2011) es calculen el nombre de vehicles necessaris i la velocitat comercial a cada finestra temporal, quan no es requereix recarrega, equacions (1) i (2), respectivament. En les equacions, v_i representa la velocitat comercial, τ és el temps addicional per parada degut a l'acceleració i el període de frenada i τ' és el temps que necessita un

passatger per pujar al bus. El superíndex 0 representa el cas d'estudi quan la recarrega elèctrica no afecta.

$$M^0(i) = \frac{2L}{H_i v_c^0(i)} \quad (1)$$

$$v_c^0(i)^{-1} = \left(\frac{1}{v_i} + \frac{1}{s} \tau + \frac{\Lambda_i H_i}{2L} \tau' \right) \quad (2)$$

Quan l'últim període estacionari finalitza, assumim que comença un nou i addicional període de llargària h_{NIGHT} on no hi ha servei de bus. Tots els autobusos estan a cotxera per ser netejats, recarregats i emmagatzemats. Aquest període pot ser negligit si el sistema funciona tot el dia.

La mida de la flota que s'ha d'assignar a la línia serà $M_T^0 = \max_i M^0(i)$. S'ha de definir un increment de flota per cada canvi de finestra temporal estacionaria i en relació al període anterior, és a dir, que per cada període tindrem un nombre de busos necessari i s'ha de saber si cada canvi s'han d'incrementar o disminuir els busos. Aquest increment es calcularà de la següent manera $\Delta M^0(i) = M^0(i) - M^0(i-1)$ on $M^0(0)$. Aquestes variables es calculen mitjançant l'equació (1), tenint en compte la finestra temporal.

Definirem $M_{IN}^0(i)$ i $M_{OUT}^0(i)$ com el nombre de vehicles introduïts al servei i el nombre de vehicles en servei que es treuen, respectivament. Si els vehicles no presenten cap restricció en el seu quilometratge, un terme $M_{IN}^0(i)$ o $M_{OUT}^0(i)$, com a mínim, serà zero. Però, en cas que la recarrega elèctrica si afecti, superíndex 1, els dos termes $M_{IN}^1(i)$ i $M_{OUT}^1(i)$, poden ser positius, si un vehicle es queda sense bateria. Per tant, el nombre de vehicles afegits o eliminats de la ruta, han de complir l'equació (3).

$$\Delta M^0(i) = M^0(i) - M^0(i-1) = M_{IN}^0(i) - M_{OUT}^0(i) \quad (3)$$

- Consum d'energia i capacitat de les bateries.

El consum d'energia de un únic vehicle per recórrer una distància x es calcula com $(x \cdot f_c)$, on f_c és el factor de consum energètic associat a la tecnologia del vehicle en servei $(\frac{kWh}{veh} - km)$. La capacitat efectiva de les bateries es calcula amb $E = E'(1 - SOC_{min})$, on SOC és el l'estat de carrega (*State of charge*). El valor mínim d'energia que han de presentar els busos al moment de posar-los en servei ha de ser $(SOC_{min} E')$.

Per qualsevol període temporal i on $M_{IN}^0(i) > 0$, s'ha de comprovar si aquest vehicles introduïts al sistema seran capaços de donar servei fins al final del dia o si s'hauran de carregar durant un període entremig, $j > i$, $\sum_{k=1}^j h_k < h_{DAY}$. L'energia consumida abans d'iniciar el període de servei i es defineix com $C(i) = f_c \sum_{j=1}^{i-1} h_j v_c^0(j)$, i la energia restant que queda emmagatzemada a la bateria es defineix com $B^0(i)$ quan no es realitza una operació de recarrega. Per assegurar que les bateries tenen suficient energia per complir el servei durant el període i , s'ha de complir l'equació (4).

$$B^0(i) = E - C(i) \geq 0 \quad (4)$$

- Nous temps crítics degut a el rang dels vehicles elèctrics.

La variable que defineix el temps absolut dels vehicles, que en ser introduïts al servei al començament del període i es quedaran sense bateria, és: $T_{end}(i) = T_R(i) + \sum_{j=1}^{i-1} h_j$. On $T_R(i)$ és el temps màxim de recorregut del vehicle al començament del període. El càlcul d'aquest temps recorregut es realitza identificant el temps addicional t_{k^*} des del començament del proper període temporal k^* que compleix la següent equació (5).

$$t_{k^*} | \quad E = f_c \left(\sum_{j=i}^{k^*-1} h_j v_c^0(j) + t_{k^*} v_c^0(k^*) \right) \text{ on } 0 \leq t_{k^*} < h_{k^*} \quad (5)$$

El primer terme del parèntesi és la distancia recorreguda per un sol vehicle des del període i fins la última finestra temporal que es realitzarà completament. El segon terme, considera la distancia parcial recorreguda durant el període de temps on el vehicle es quedarà sense bateria. Per tant el temps en el que es consumeixen les bateries es defineix finalment com $T_R(i) = \sum_{j=i}^{k^*-1} h_j + t_{k^*}$. El període temporal en que un vehicle introduït al període i es quedarà sense bateries serà $N_{end}(i)$. La seva estimació s'aproximarà de manera iterativa fins a complir la expressió: $\sum_{j=1}^{N_{end}(i)-1} h_j \leq T_{end}(i) < \sum_{j=1}^{N_{end}(i)} h_j$. Els dos termes $T_{end}(i)$ i $N_{end}(i)$ ens defineixen exactament en quin temps i període haurem de realitzar una operació de carrega. Si un vehicle introduït en el període i te energia suficient per completar el servei fins al final del dia, ho definirem com: $N_{end}(i) = N + 1$.

Per una altre banda, la variable $T_{ST}(i)$ té en consideració el temps màxim inicial en el qual els vehicles que s'han de treure de servei al període i es poden introduir al servei. Aquesta variable es defineix com $T_{ST}(i) = \sum_{j=1}^i h_j - T_{RR}(i)$. El terme $T_{RR}(i)$ és el màxim recorregut que poden fer aquells vehicles els quals se'ls hi esgotaran la bateria a l'últim segon del període i . El màxim temps de recorregut pot ser calculat mitjançant la equació $T_{RR}(i) = \sum_{j=1}^{m^*-1} h_{i-j+1} + t_{m^*}$, on t_{m^*} és el temps fins el temps inicial del període m^* que compleix l'equació (6).

$$t_{m^*} | \quad E = f_c \left(\sum_{j=i}^{m^*-1} h_{i-j+1} v_c^0(i-j+1) + t_{m^*} v_c^0(m^*) \right) \text{ and } 0 \leq t_{m^*} < h_{m^*} \quad (6)$$

Així doncs, la variable $N_{ST}(i)$ denota el període de temps en que aquests vehicles que entren el sistema i que no tenen suficient energia per arribar al període i . Es calcula, també, de manera iterativa des de el període i cap a períodes més antics fins a complir l'expressió: $\sum_{j=1}^{N_{ST}(i)-1} h_j \leq T_{ST}(i) < \sum_{j=1}^{N_{ST}(i)} h_j$. El temps màxim de recorregut són estimats en direcció positiva i negativa al eix del temps. $T_R(i)$ i $T_{RR}(i)$ són iguals en el nostre model si la velocitat comercial dels busos és constant al llarg de tot el dia. Definim $N_{ST}(i) = 0$ si els vehicles introduïts al primer període completaran el servei en la finestra temporal i amb suficient energia.

Tots els vehicles introduïts des del període $m = 1$ to $m = N_{ST}(N)$ han de ser carregats durant el servei o reemplaçats per altres vehicles. La operació de carrega o el reemplaçament del vehicle que ha entrat al període m , ha de ser realitzat no més tard que $T_{end}(m)$, és a dir, abans del període $N_{end}(m)$.

4.2. Models de recàrrega

Els vehicles no tenen suficient autonomia quan $T_{end}(1) < h_{DAY}$, i han de ser recarregats durant el període h_{DAY} . Aquesta situació és equivalent a $T_{ST}(N) > 0$ i $N_{ST}(N) > 0$. Per aquest cas, tenim dos tipus diferents de models de carrega capaços de estendre el servei fins al final del dia:

- Model A: consisteix en recarregar el bus durant el dia a coxera. Abans de que l'energia emmagatzemada al vehicle es consumeixi ($B^0 = 0$), aquest vehicle ha de arribar a cotxera per ser recarregat. Un cop la bateria es carregada completament o parcialment, el vehicle pot ser tornat a posar en servei. Aquest temps de carrega i els temps de recorregut fins a cotxera incrementen la mida de la flota i la complexitat de la gestió dels recursos.
- Model B: representa un model on tindrem unes estacions de carrega al carrer (*opportunity charging*), a prop o a les mateixes parades de final de trajecte de manera que tots els busos poden ser recarregats aquestes estacions. Aquest model combina diferents cicles de consum i recarrega dels vehicles. Hi haurà casos en que la recarrega es podrà ometre, sobretot en els moments en que la velocitat de trajecte sigui baixa. Aquest model permetrà que cap bus es quedi fora de servei, per quedar-se sense bateria. També donarà oportunitat a que les agències hagin de dotar de bateries més petites i així la inversió sigui més baixa.

Els dos models, A i B, s'hauran d'utilitzar quan el període h_{NIGHT} no sigui suficientment llarg per poder carregar totes les bateries pel dia següent. Així, aquest dos models, forcen que la mida de la flota, calculada a l'equació (1), ha de ser augmentada, degut els temps perduts per les recàrregues.

Si el període h_{NIGHT} és suficientment llarg per poder carregar totes les bateries, tindrem un tercer model, model C, en que els vehicles seran recarregats completament durant la nit sense necessitat de recarregar durant el dia. La manera de operar aquest model és molt similar als model dels ICE. El nombre de carregadors i les operacions de càrrega es poden descriure utilitzant una aproximació del model A.

4.3. Model A: recarrega durant el dia a cotxera

El procediment està desenvolupat pel cas general en el que els vehicles no tenen suficient rang per complir tot el dia, i han de ser recarregats durant el dia h_{DAY} a cotxera, amb un sistema de recàrrega ràpida.

4.3.1. Operacions de càrrega a cotxera durant el període h_{DAY}

Es considera que els vehicles afegits o apartats a cada període i estan definits com $M_{IN}^0(i) = \Delta M^0(i)$ i $M_{OUT}^0 = 0$ si $\Delta M^0(i) \geq 0$. I quan $\Delta M^0(i) < 0$, les variables estan oposades $M_{IN}^0(i) = 0$ i $M_{OUT}^0 = \Delta M^0(i)$. Les assumpcions que es realitzen són les següents:

- $N_{ST}(N) > 0$, així doncs, tots els vehicles introduïts al servei durant el primer període $N_{ST}(N)$ hauran de ser reemplaçats.
- $M_{DEP}(k, j)$ descriu el nombre de vehicles que han començat el servei al període k i que han sigut dirigits a cotxera al període j , per ser recarregats, tenint en compte que la mida de la flota al període j ha de ser reduït ($M_{OUT}^0(j) > 0$).
- $N_{DEP}(k, j)$ defineix a quina finestra horària, els busos previs $M_{DEP}(k, j)$, seran reintroduïts en el servei, un cop hagin estat recarregats.
- Els moviments de vehicles pot incrementar en alguns períodes, per lo que les variables $M_{IN}^1(i)$ i $M_{OUT}^1(i)$ ens definiran finalment el nombre total de vehicles introduïts i apartats del servei al començament del període i .
- El consum energètic de cada finestra horària i es més baix que la capacitat de la bateria E .

Es realitzarà un procés d'enumeració per cada període i , començant pel més antic $i = 1$, i acabant per l'últim període abans de la nit $i = N$. El procés d'enumeració fet a cada finestra horària, segueix els següents passos:

- Pas 1:

Primer de tot, es defineix el nombre de vehicles que es quedaran sense bateria al període i mitjançant la variable $M_{NB}(i)$. Es fa una estimació d'aquesta variable amb l'equació (7). Sigui $End(i)$ el subconjunt de períodes en els que els vehicles iniciaven el servei i que es quedaran sense bateria a la finestra horària i .

$$M_{NB}(i) = \begin{cases} \sum_{k \in End(i)}^i \left(M_{IN}^1(k) - \sum_{j=k+1}^{i-1} M_{DEP}(k, j) \right) & i = N_{end}(1), \dots, N \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (7)$$

El primer terme del sumatori, representa el nombre de vehicles que s'han introduït uns quants períodes k abans i que es quedaran sense bateria a la finestra horària i . Encara que alguns dels vehicles introduïts poden ser dirigits cap a cotxera abans, finestra horària j , del període i . Així doncs, $M_{DEP}(k, j)$ vehicles seran recarregats a cotxera entre els períodes $(j, N_{DEP}(k, j) - 1)$ i

tornats a posar en servei al $N_{DEP}(k, j)$. Els càlculs de $M_{IN}^1(k)$ i $M_{DEP}(k, j)$ estaran definits a les equacions (8b) i (11), respectivament.

○ Pas 2:

En aquest punt, s'observaran els vehicles que hauran de ser reemplaçats degut a la falta d'energia. Es calcularà el nombre final de vehicles eliminats i introduïts al servei al període i , incloent els busos elèctrics, mitjançant les equacions (8a) i (8b).

$$M_{OUT}^1(i) = \max\{M_{NB}(i); M_{OUT}^0(i)\} \quad (8a)$$

$$M_{IN}^1(i) = \max\{0; M_{NB}(i) - M_{OUT}^0(i)\} + M_{IN}^0(i) \quad (8b)$$

○ Pas 3:

El nombre de vehicles ha de ser introduït a la iteració i està dividit en dos subconjunts: $M_{IN}^1(i) = M_R(i) + M_{NEW}(i)$. $M_R(i)$ és el subconjunt de busos recarregats a cotxera durant el mateix dia i introduïts, de nou, a la línia, al començament del període i , per reemplaçar els vehicles amb una bateria baixa. Aquests busos es calculen a l'equació (9).

$$M_R(i) = \min\left\{M_{INV}(i-1) + \sum_{m=1}^{i-1} \sum_{n=m+1}^i \delta_i(m, n) M_{DEP}(m, n); M_{IN}^1(i)\right\} \quad (9)$$

$$\text{where } \delta_i(m, n) = \begin{cases} 1 & \text{if } N_{DEP}(m, n) = i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

El segon subconjunt, $M_{INV}(i)$, representa el nombre hipotètic de busos recarregats durant h_{DAY} que no s'utilitzen al començament del període i (observar equació (10)). Per coherència, $M_R(1) = M_{INV}(1) = 0$. Finalment, el nombre de nous busos requerits a la finestra horària i que serà posat en servei en el mateix dia, es calcularà mitjançant $M_{NEW}(i) = M_{IN}^1(i) - M_R(i)$, amb els valors aconseguits a les equacions (8b) i (9).

$$M_{INV}(i) = \max\left\{0; M_{INV}(i-1) - M_R(i) + \sum_{m=1}^{i-1} \sum_{n=m+1}^i \delta_i(m, n) \cdot M_{DEP}(m, n)\right\} \quad (10)$$

○ Pas 4:

El següent pas del procediment és per saber si els vehicles $M_{IN}^1(i)$ introduïts al servei al període i , se'ls hi acabaran les bateries en algun moment del dia o si continuaran en servei fins que no se'ls necessiti. La variable $M_{DEP}(i, j)$ ens definirà quants vehicles introduïts a la finestra horària i seran apartats al començament del període j ($j > i$). La estratègia òptima per definir el reemplaçament consisteix en:

- i) Prendre avantatge dels períodes futurs, on $\Delta M^0(j) < 0$, i apartar els vehicles que es quedaran sense bateria més aviat.
- ii) Quan tenim un període j que compleix la condició $\Delta M^0(j) > 0$ apartar els vehicles que portin més temps en servei.
- iii) Quan una operació de recàrrega, durant el dia, es completa, els vehicles recarregats s'hauran d'introduir al servei lo abans possible.

Es realitza un mètode iteratiu des de $j=i+1$ to $j= N_{end}(i)-1$, per identificar a quin següent període j , un nombre de $M_{DEP}(i, j)$ vehicles s'hauran de retirar. L'equació (11) ens proveeix la fórmula per calcular $M_{DEP}(i, j)$, tenint en compte els resultats de la prèvia iteració.

$$M_{DEP}(i, j) = \begin{cases} \min \left(M_{IN}^1(i) - \sum_{k=i+1}^{j-1} M_{DEP}(i, k) ; M_{OUT}^0(j) - \sum_{m=1}^{i-1} M_{DEP}(m, j) \right) & \text{if } j < N_{end}(i) \\ M_{IN}^1(i) - \sum_{k=i+1}^{j-1} M_{DEP}(i, k) & \text{if } j = N_{end}(i) \end{cases} \quad (11)$$

El resultat de $M_{DEP}(i, j)$ ha de complir, també, l'equació (12), per assegurar la conservació dels vehicles al sistema. Encara que alguns vehicles tinguin suficient energia per mantenir-se en servei, aquests seran retirats al començament del període $N + 1$.

$$M_{OUT}^1(N + 1) = \sum_{k=1}^{i-1} M_{DEP}(k, N + 1) \quad (12)$$

Aquests $M_{DEP}(i, j)$ vehicles estaran preparats per ser introduïts, de nou en servei, en un període m , on $j < m$. El temps de recàrrega que tenen els busos per carregar entre el període j i l'inici del període m és $T_{CH}(j, m) = \left(\sum_{k=j}^{m-1} h_k \right) - \frac{\ell_G}{v_j} - \frac{\ell_G}{v_{m-1}}$, on s'han exclòs els temps morts d'anada i tornada a cotxera. Es vol escollir el mínim període $N_{DEP}(i, j)$ assegurant que els vehicles s'han carregat completament o, al menys, el suficient com per poder estar en servei el fins que s'acabi el h_{DAY} . Així doncs, la següent finestra horària en la qual els vehicles $M_{DEP}(i, j)$ estaran disponibles un altre cop s'anomenarà $N_{DEP}(i, j)$. La seva estimació es durà a terme amb l'equació (13). S_D és la velocitat de carga dels carregadors ràpids a cotxera.

$$\text{Min } N_{DEP}(i, j) = m \mid S_D \cdot T_{CH}(j, m) \geq \min \left\{ E; \left(f_c \sum_{k=m}^N h_k v_c^0(k) \right) \right\} \quad (13)$$

○ Pas 5:

Finalment, el procediment es para quan l'últim període $i = N$ acaba i s'analitza i les corresponents variables es calculen.

La solució iterativa de les equacions (7)-(13) a cada període $i = 1 \dots N$ proveeixen les variables operacionals requerides per poder descriure el sistema de recàrrega operacional diari. La estimació de les variables $M_{DEP}(m, n)$ ($m, n = 1, \dots, N$; $m < n$) està feta seguint el criteri de recàrrega a cotxera quan abans millor, per poder augmentar els vehicles utilitzables per períodes futurs i incrementar els vehicles reutilitzables $M_{INV}(i)$.

La variable $N_{DEP}(m, n)$, en canvi, només identifica el període en el qual els vehicles a cotxera podran ser incorporats un altre cop en servei. Però, no significa que aquest vehicles $M_{DEP}(m, n)$ siguin necessaris al període $M_{DEP}(m, n)$. De fet, degut al procés iteratiu, no podem saber, al període i sota estudi, quants vehicles es necessitaran en un període futur j . Aquests vehicles poden ser portats a cotxera $M_{INV}(i)$, o bé, introduïts de nou al servei, $M_R(i)$. Una part dels vehicles que van a cotxera $M_{INV}(i)$, no es necessitaran més en tot el dia, per lo que aquests vehicles s'han de separar i esperar fins la nit a ser recarregats. De fet, s'ha de minimitzar els vehicles recarregats durant el dia, ja que es més car que recarregar-los per la nit.

Així doncs, dividirem els vehicles de cotxera $M_{INV}(i)$ i la variable $M_{DEP}(m, n)$ en dos components, com es mostra a les equacions (14) i (15). La primera part pels vehicles que seran posats en servei un altre cop durant el dia (subíndex D) i l'altre pels vehicles que esperaran a cotxera per ser recarregats durant la nit (subíndex N).

$$M_{INV}(i) = M_{INV,D}(i) + M_{INV,N}(i) \quad (14)$$

$$M_{DEP}(m, n) = M_{DEP,D}(m, n) + M_{DEP,N}(m, n) \quad (15)$$

El càlcul de $M_{INV,D}(i)$ es realitza seguint el següent procediment. Definim $A^0(i) = \sum_{m=1}^N \sum_{n=m+1}^i \delta_i(m, n) M_{DEP}(m, n)$ com els vehicles disponibles per ser introduïts al servei al període $i = 1 \dots N$. Ara, volem considerar el nombre mínim d'aquests vehicles recarregats per ser re introduïts al període i considerant futures demandes, mitjançant $A^1(i) = \sum_{m=1}^N \sum_{n=m+1}^i \delta_i(m, n) M_{DEP,D}(m, n)$. La funció objectiu per aconseguir la mínima flota recarregada durant el dia es formula amb l'equació (16). Les variables de decisió són els vehicles posats en servei de nou al període i , $A^1(i)$, i els vehicles recarregats a cotxera $M_{INV,D}(i)$.

$$\min \sum_{i=1}^N A^1(i) = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{n=m+1}^i \delta_i(m, n) M_{DEP,D}(m, n) \quad (16)$$

L'equació (17) ens marca la conservació del flux a cada finestra horària i . I l'equació (18) ens delimita el nombre màxim de vehicles introduïts a la iteració i . En aquest tipus de formulació, el nombre de vehicles introduïts de nou al servei $M_R(i)$ es pot calcular, encara, per la prèvia equació (9). Hem d'establir $A^1(1) = A^1(2) = M_{INV,D}(1) = M_{INV,D}(2) = 0$ per assegurar la consistència amb el procés de recarrega i $M_{INV,D}(N) = 0$ per evitar un acumulació de vehicles al últim període del dia.

$$A^1(i) = M_{INV,D}(i) - M_{INV,D}(i-1) + M_R(i) \quad \forall i \quad (17)$$

$$A^1(i) \leq A^0(i) \quad \forall i \quad (18)$$

La solució al problema de les equacions (16)-(18) es resol mitjançant un algorisme (Taula A1) que proposa un procés iteratiu per avaluar la variable $A^1(i)$ a cada període.

L'equació de conservació dels vehicles començada a l'equació (10) ha de ser complerta considerant el nombre mínim de vehicles recarregats durant el dia. Amb l'equació (9) avaluada amb $M_{INV,D}(k)$ i $A^1(k)$ a la mateixa equació amb $M_{INV}(k)$ i $A^0(k)$, obtenim l'equació (19). El terme $A^0(k) - A^1(k)$ és una funció que augmenta de manera monòtona i defineix el nombre de vehicles que poden ser carregats però que no es posaran en servei, per tant, l'operació de recàrrega s'estalvia i per tant, aquests vehicles s'esperaran a cotxera a ser carregats durant la nit, $M_{INV,N}(i)$.

$$A^0(k) - A^1(k) = M_{INV}(k) - M_{INV,D}(k) - (M_{INV}(k-1) - M_{INV,D}(k-1)) \geq 0 \quad k = 1, \dots, N \quad (19)$$

Un cop tenim calculat $A^1(k)$ i $M_{INV,D}(k)$ sabem quin nombre de vehicles que s'han tret del servei en períodes anteriors han de ser reintroduïts al servei al període k . Si $A^0(k) - A^1(k) > 0$ i $N_{DEP}(i, j) = k$, el procediment anomenat INV-N (Taula A2) fa una estimació dels vehicles que s'han de carregar durant la nit $M_{INV,N}(j)$ i els vehicles que s'han retirat del servei al període j .

Finalment, la mida màxima de la flota en cas de operar amb vehicles elèctrics, M_T^1 , es defineix a l'equació (20) com la suma de tots els vehicles introduïts al servei a tots els períodes, restant aquells que s'han posat en servei de nou després de ser carregats durant el dia.

$$M_T^1 = \sum_{i=1}^N M_{NEW}(i) = \sum_{i=1}^N (M_{IN}^1(i) - M_R(i)) \quad (20)$$

4.3.2. Operacions de càrrega durant la nit a cotxera

La operació de càrrega considera els vehicles carregats durant la nit i a l'últim període del dia a cotxera amb carregadors de recàrrega lenta. Aquesta operació, que és la mateixa que el model C, és complementaria a la recàrrega durant el dia h_{DAY} .

Els vehicles, un cop han estat carregats a cotxera amb una velocitat de càrrega S_N ($S_N \leq S_D$), poden entrar en servei al següent dia, tenint en compte la mida de la flota necessària. Definirem T_{el} com el temps inicial en el qual el temps de recàrrega nocturn està disponible respecte la primera hora de servei, i N_{el} el període de temps el qual després d'ell comença el període de recàrrega nocturna ($T_{el} = \sum_{i=1}^{N_{el}} h_i$). Considerem que els vehicles recarregats durant la nit han de ser aquells que pertanyen al subgrup $M_{INV,N}(i)$ a cada període $i \leq N$.

Per simplificar, assumim que dos dies de servei consecutius amb un període de càrrega nocturna presenten els mateixos períodes estacionaris, demanda, velocitats i, per tant, el mateix nombre de vehicles $M^1(i)$ a cada període $i = 1 \dots N$. Encara que aquesta metodologia es pot adaptar fàcilment si dos dies de servei consecutius tenen diferent patrons de servei.

Les operacions d'entrada, sortida durant la nit i posada en servei estan controlats per la variable $M_{R,N}(i, k)$. Aquest terme, calculat a l'equació (21), denota el nombre de vehicles que començaran a proveir el servei al període k , i que s'han començat a recarregar al període i del dia anterior. També, la variable $M_{INV,N}(i)$, definida amb anterioritat, defineix els vehicles disponibles a cotxera al període i on el seu període de càrrega pot començar al període més alt

entre $\{N_{el}, i\}$. Excloem del previ subgrup de vehicles la mida màxima de la flota requerida als següents períodes, ja que aquests vehicles seran posats en servei de nou i la operació de recàrrega es veurà truncada.

$$M_{R,N}(i, k) = \max \left\{ 0; \min \left[M_{IN}(k) - M_R(k) - \sum_{j=N_{el}}^{i-1} M_{R,N}(j, k); M_{INV,N}(i) - \sum_{j=N_{el}}^N \sum_{m=1}^{k-1} M_{R,N}(j, m) - \sum_{m=N_{el}}^{i-1} M_{R,N}(m, k) \right] \right\} \quad (21)$$

La condició necessària que s'ha de complir per tenir les bateries completament carregades al començament del període k quan el vehicle ha arribat al període i del dia anterior està expressada a l'equació (22). Si aquesta equació no es compleix, el període de recàrrega entre els períodes i i k no es possible.

$$E < \left\{ \left(h_{DAY} + h_{NIGHT} + \sum_{m=1}^{k-1} h_m \right) - \sum_{n=1}^{i-1} h_n \right\} \frac{1}{S_N} \quad (22)$$

4.3.3. Nombre de carregadors necessaris

$N_{ch,D}$ i $N_{ch,N}$ seran el nombre de carregadors ràpids que s'utilitzen durant el dia h_{DAY} i de carregadors lents necessaris per la recàrrega nocturna, respectivament. Calcularem el nombre de carregadors necessaris durant el dia i la nit independentment, com a resultat de dos problemes d'optimització.

En les operacions de càrrega durant el dia, l'objectiu és identificar el nombre mínim de carregadors ràpids $N_{CD}(i)$ necessaris al període i , equació (23), que compleix les restriccions definides a les equacions (24) i (25).

$$\begin{aligned} \min N_{CD}(i) \\ \text{s.t.} \end{aligned} \quad (23)$$

$$[T_D(i, N_{CD}(i)) + w_{N,i} < T_{eD}(i)]$$

or

$$[T_D(i, N_{CD}(i) - N_{CD}(i-1)) < T_{eD}(i) \text{ and } N_{CD}(i) > M_{rech,D}(i)] \quad (24)$$

$$N_{CD}(i) \geq N_{CD}(i-1) \quad (25)$$

Direm que $M_{rech,D}(i) = \left(M_{OUT}^1(i) - (M_{INV,N}(i) - M_{INV,N}(i-1)) \right)$ serà els vehicles apartats del servei al començament del període $i = 1 \dots N$, que poden ser carregats durant el dia, h_{DAY} . El temps necessari per carregar aquests vehicles quan tenim m ($m = 1, 2, 3, \dots, \infty$) carregadors disponibles es defineix com $T_D(i, m) = \frac{\min(E; \sum_{k=1}^{i-1} f_c v_c^0(k) h_k) M_{rech,D}(i)}{S_D \min(M_{rech,D}(i); m)}$. El numerador defineix l'energia total a ser carregada a tots els vehicles que han arribat a cotxera al període i mentre que el denominador la velocitat de càrrega del sistema tenint en compte els m carregadors. Assumim que els vehicles només poden ser carregats amb un carregador alhora.

Com que els carregadors estaran ocupats pels vehicles que han arribat al període $k < i$, els vehicles que arriben hauran d'esperar fins que quedi un carregador lliure. El terme $w_i = \max[0; (T_D(i-1, N_{CD}(i-1)) - h_{i-1} + w_{i-1})]$ defineix en quin moment del període i quins carregadors estan recarregant als vehicles arribant al període $k < i$. Aquest w_i , és un retard del temps de càrrega inicial dels vehicles que arriben al període i . Per això, la desigualtat esquerra de l'equació (24) força que el temps de càrrega a cotxera, començant a w_i unitats de temps després del començament del període i , ha de ser inferior que la diferencia entre el vehicle que arriba més aviat i el temps inicial del període i . En aquest càlcul, exclouem el temps mort d'anar des de cotxera fins a la primera aturada del trajecte. Aquest temps, $T_{eD}(i)$, es calcula $T_{eD}(i) = \sum_{k=i}^{n^*(i)-1} h_k - \frac{\ell_G}{v_i} - \frac{\ell_G}{v_{n^*}}$, on $n^*(i) = \min_k N_{DEP}(k, i) \mid M_{DEP}(k, i) > 0$. Si la desigualtat de l'esquerra no es compleix, haurem de afegir carregadors addicionals al període i ($N_{CD}(i) > N_{CD}(i-1)$). Fent això, el $M_{rech,D}(i)$ pot començar a ser carregat al començament del període i sense retard si $N_{CD}(i) - N_{CD}(i-1)$ carregadors estan disponibles. La resta de carregadors $N_{CD}(i-1)$ s'utilitzaran pels vehicles carregats a períodes anteriors. La restricció (25) assumeix que el nombre de carregadors calculats per un període de temps s'utilitzaran durant tot el dia.

El segon problema d'optimització, té com a objectiu minimitzar el nombre de carregadors lents durant la nit $N_{CN}(i)$ que s'han d'utilitzar a cada període $i = N_{el} \dots N$, equació (26), complint, també, la restricció temporal de l'equació (27). En aquest cas, els carregadors durant la nit comencen a funcionar al període N_{el} . El procediment és similar al dels carregadors ràpids. El nombre de vehicles que s'han de començar a carregar al període i , esta definit per $M_{rech,N}(i) = \sum_{k=1}^N M_{R,N}(i, k)$. Definim $T_N(i, m)$ com el temps de càrrega dels vehicles al període i quan m carregadors estan disponibles ($m = 1, 2, 3 \dots \infty$), calculat mitjançant

$$T_N(i, m) = \frac{\min(E; \sum_{k=1}^{i-1} f_C v_{C,k} h_k) M_{rech,N}(i)}{S_N \min(M_{rech,N}(i); m)}.$$

Alguns dels carregadors pot estar ocupat per vehicles que han arribat abans, per tant el retard al període i és $w_{N,i} = \max[0; (T_N(i-1, N_{CN}(i-1)) - h_{i-1} + w_{N,i-1})]$. Així doncs, la part esquerra de la restricció (27) ens defineix que el temps de càrrega d'aquells vehicles que comença $w_{N,i}$ unitats de temps del començament del període i , ha d'acabar abans de la primera entrada d'un vehicle a la finestra horària n^* del dia següent. Aquesta primera hora es calcula amb $T_{eN}(i) = (h_{DAY} - \sum_{k=1}^{i-1} h_k) + h_{NIGHT} + \sum_{k=1}^{n^*-1} h_k - \frac{\ell_G}{v_i} - \frac{\ell_G}{v_{n^*}}$, on $n^* = \min k \mid M_{R,N}(i, k) > 0$. Malgrat això, a la part dreta de l'equació, assumim que els $M_{rech,N}(i)$ vehicles que han de ser carregats in aquest període, poden començar el procés de càrrega a l'inici del període i si tenim $N_C(i) - N_C(i-1)$ carregadors disponibles pels nous vehicles.

$$\begin{aligned} &\min N_{CN}(i) \\ &\text{s.t.} \end{aligned} \tag{26}$$

$$\begin{aligned} &[T_N(i, N_{CN}(i)) + w_{N,i} < T_{eN}(i)] \\ &\text{or} \end{aligned} \tag{27}$$

$$[T_N(i, N_{CN}(i) - N_{CN}(i-1)) < T_{eN}(i) \text{ and } N_{CN}(i) > M_{rech,N}(i)]$$

$$N_{CN}(i) \geq N_{CN}(i - 1) \quad (28)$$

En els dos problemes, el temps que necessiten els vehicles per ser situats per poder començar a ser carregats, és negligible. La solució dels problemes (23)-(25) i (26)-(28) es soluciona fent un procés iteratiu en ordre creixent des de $i = 1$ fins $i = N + 1$. El nombre de carregadors que s'han de disposar és igual al $N_{ch,D} = N_{CD}(N + 1)$ i $N_{ch,N} = N_{CN}(N + 1)$.

Encara que el nombre de carregadors de dia i de nit es calculen de forma independent, els carregadors ràpids poden, també, proveir energia durant la nit. Això ens porta a un problema acoblat on els carregadors ens produiran diferents temps de serveis depenent en el tipus de vehicle i la prioritat de càrrega s'haurà de donar a les recarregues durant el dia. Això passarà quan tinguem un període i on hi hagi arribades de vehicles que han de ser carregats per mitjà dels dos tipus de càrrega, ràpida i lenta, per exemple $M_{R,N}(i, k) > 0$ i $M_{DEP}(k, i)\delta_m(k, i) > 0 \forall k, m$. La solució d'aquest nou problema no és trivial i assumim que el terme $(N_{ch,N} + N_{ch,D})$ pot provocar una sobreestimació dels recursos necessaris. Malgrat això, el preu de l'electricitat durant la nit és més baix que durant el dia, per tant, les empreses prefereixen esperar a la nit per carregar els vehicles, però han de tenir alguns vehicles disponibles que siguin carregats durant el dia. Com que retardem la operació de càrrega a la nit, amb la variable T_{el} , la probabilitat de tenir el problema acoblat es redueix. De fet, si la variable T_{el} és més elevada que l'últim període de recàrrega durant el dia, els dos problemes es poden solucionar de manera independent i el nombre total de carregadors necessaris es pot calcular amb l'equació (29).

$$N_{ch,T} = N_{ch,D} + \max[0; N_{ch,N} - N_{ch,D}] \quad (29)$$

4.4. Model B: recàrrega a carrer (opportunity charging)

Hi ha dos tipus de *opportunity charging*, depenent de la capacitat de la bateria i la llargària de la ruta. Al primer tipus B1, els vehicles han de realitzar, com a mínim, una operació de càrrega durant cada viatge d'anada i tornada al període en estudi, incrementant el temps de cada cicle i, com a conseqüència, incrementant també, la mida de la flota. Aquesta manera d'operar és eficient quan la capacitat de la bateria és baixa, comparada a l'energia consumida durant cada període. Malgrat això, les agències de transports poden treure avantatge de introduir de nou i treure vehicles del servei al final de cada període per carregar les bateries. Per això, el segon tipus de *opportunity charging*, B2, es duu a terme en els temps de transició entre els períodes. Aquest mètode de càrrega no augmenta necessàriament el temps de recorregut ni la mida de la flota. Aquest segon mètode no serà estudiat en aquest treball.

4.4.1. Tipus B1. Operació de càrrega a cada viatge d'anada i tornada

Assumim que hi ha un carregador disponible a una distància l_A de l'última parada A i un segon carregador a una distància l_B de l'última parada B (figura X). Definirem $d_C(i)$ com la distància recorreguda entre dos operacions de càrrega consecutives. Aquesta variable serà igual a $d_C = \min[2l_A + 2L; 2l_B + 2L]$ quan realitzem només una operació de càrrega per cada volta,

viatge d'anada i tornada, a A o B, i $d_c(i) = l_A + L + l_B$ quan els busos es carreguen als dos carregadors, A i B.

En els dos casos, s'ha d'assegurar que l'energia necessària per recórrer $d_c(i)$ es compatible amb la capacitat de la bateria. La situació definida per $(l_A + L + l_B) > E/f_c$ no està considerada en aquest treball. Voldria dir que s'haurien de posar més carregadors entre parades intermèdies.

L'equació (30) estima el temps de volta $R_D(i)$ en el període $i = 1 \dots N$. En les dues situacions, el primer terme representa el temps necessari per recórrer la distància entre l'última parada i els carregadors, l'anomenem temps mort, un segon terme que representa el temps necessari per recorre la distància de la línia L a una velocitat comercial $v_c^0(i)$ i l'últim terme, té en compte el temps de càrrega a cada carregador, $T_{ch}^o(i)$.

$$R_D(i) = \begin{cases} \min\left[\frac{2l_A}{v_i} + \frac{2L}{v_c^0(i)}; \frac{2l_B}{v_i} + \frac{2L}{v_c^0(i)}\right] + T_{ch}^o(i) & \text{if } d_c = \min[2l_A + 2L; 2l_B + 2L] \\ 2\left(\frac{l_A + l_B}{v_i} + \frac{L}{v_c^0(i)}\right) + 2T_{ch}^o(i) & \text{if } d_c(i) = l_A + L + l_B \end{cases} \quad (30)$$

El teòric temps de càrrega es calcula considerant l'energia consumida al segment de la ruta entre dos operacions de càrrega consecutives, $T_{ch}^o(i) = \frac{d_c(i)f_c}{S_D}$. Encara que, en segons quines línies amb uns temps de recorregut més curts, on $\frac{d_c(i)f_c}{S_D} > H_i$, el temps perdut al carregador no permet despatxar vehicles des de la parada inicial. D'aquesta manera, les agències de tràfic, han de posar plataformes amb múltiples carregadors, per poder operar diferents vehicles al mateix temps. En aquest treball, considerarem una configuració tàndem a les estacions de càrrega. Assumim que hi ha P plataformes tipus tàndem a cada final de trajecte, A i B, i un vehicle arriba a la zona de càrrega al temps $t = 0$. Trigarà t_1 unitats de temps en ocupar la plataforma i en col·locar el dispositiu de càrrega a la font d'electricitat. A posteriori, trigarà t_r unitats de temps en carregar les bateries i un temps t_2 en marxar la plataforma abans que arribi el següent vehicle. Així doncs, quan $t = H_i$, assumim que el primer vehicle s'atura a la segona plataforma mentre que la primera plataforma es ocupada pel vehicle que acaba d'arribar. Els dos vehicles perdran un t_1 unitats de temps en connectar-se, t_r unitats de temps en carregar-se i t_2 unitats de temps en marxar de la plataforma. Podem estendre aquesta seqüència operacional (figura X). Si l'arribada dels vehicles es perfectament regular, llavors $H_i = t_1 + t_r + t_2$ i el temps de càrrega a tots els períodes serà el mateix, t_r . En aquesta situació, el nombre mínim de plataformes, assegurant que tots es vehicles seran carregats es determina amb $t_r = \frac{d_c(i)f_c}{S_D P_{min}} < H_i - t_1 - t_2$.

D'altra manera, si la regularitat d'arribada no és perfecte, el temps entre dos arribades consecutives pot ser inferior o superior al objectiu H_i . Si un vehicle arriba a la plataforma al temps $H_i + \Delta$ respecte el vehicle de davant (exemple bus numero 5), el temps de càrrega que tindrà es redueix a $t_r - \Delta$. Definim el temps de posicionament $t_{pos} = t_1 + t_2$. Davant d'arribades irregulars, la restricció energètica que s'ha de verificar és $(t_r - \Delta) + (P_{min} - 1)t_r \geq \frac{d_c(i)f_c}{S_D}$, on $t_r = H_i - t_{pos}$.

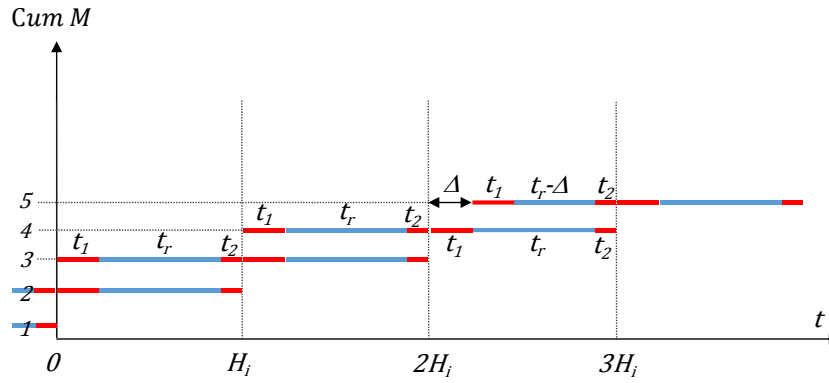


Figura 17: Esquema de les operacions de càrrega

Font: ZeEUS

Definim la variable $N_{ch,o}(i)$, com el nombre mínim de plataformes a cada estació de càrrega que s'utilitzaran al període i . Amb l'equació (31) estimem aquesta variable, on l'operador matemàtic $[x]^+$ representa l'arrodoniment a l'enter superior. El retard es pot calcular com $\Delta = c_v H_i$, on c_v es el coeficient de variació dels temps d'arribada a l'última parada i H_i és el temps objectiu. Finalment, el temps que es perd a l'estació de càrrega és $H_i \cdot N_{ch,o}(i)$ i el temps mínim de càrrega es defineix a l'equació (32). El valor obtingut a l'equació (32) ha de ser reemplaçat a l'equació (30) per calcular el temps de volta a cada període.

$$N_{ch,o}(i) = \left\lceil \frac{d_c(i)f_c/S_D + \Delta}{(H_i - t_{pos})} \right\rceil \quad (31)$$

$$T_{ch}^o(i) = t_{pos}N_{ch,o}(i) + \frac{d_c(i)f_c}{S_D} \quad (32)$$

Amb tot això, la nova mida de la flota necessària amb aquest sistema de càrrega, es defineix com $M^1(i) = [R_D(i)/H_i]^+$. El nombre de vehicles a la flota serà més elevat que en el model A, degut a la presència de moviments morts i de càrrega en servei. La variable $v_c^0(i)$ representa la velocitat comercial al període i que s'ha d'utilitzar els temps de viatges.

Des de la perspectiva de l'agència de tràfic, definim la velocitat comercial neta com $v_c^1(i) = \frac{2(l_A + l_B)}{M^1(i)H_i}$. Finalment, el nombre de zones de càrrega necessàries es calcula amb $N_{ch,S} = \max_{i=1,\dots,N} N_{ch,o}(i)$.

Aquest tipus de càrrega ha de ser realitzada a cada volta del mateix període de temps, de manera que es garanteixi el mateix temps de volta. Realitzant aquestes operacions, el vehicle recupera el desitjat estat de càrrega. De tota manera, depenent de la capacitat de les bateries, els vehicles poden ser eximits de realitzar aquestes operacions de càrrega durant les hores punta., d'aquesta manera, el nombre de vehicles extra es redueix. Per últim, definim $N_{ST}(N) = 0$, i calculem les operacions de càrrega nocturnes a cotxera necessàries, repetint les equacions del model A (6-29). En aquest procediment només es definiran el nombre de vehicles que esperaran a ser carregats durant la nit.

5. ANÀLISI DE COSTOS

El cost total que haurà d'assolir l'agència de transports es formularà en aquest apartat. Aquesta formulació s'utilitzarà per tots els esquemes de xarxa de bus.

El cost serà estimat mitjançant $Z = Z_M + Z_V + Z_C$, on Z_M és la suma del cost temporal, Z_V és el cost de la distancia i Z_C és el cost de la infraestructura.

A l'equació (33) es calcula, per cada franja temporal, el temps que els vehicles estan en servei i els temps morts d'anada i tornada de cotxera. El sumatori d'aquests termes es multiplica per coeficient del cost c_{t1} que té en compte les despeses del vehicle en servei (sou del conductor, dietes, etc...). Incloem també, el temps totals dels vehicles multiplicats pel coeficient c_{t2} (la depreciació del vehicle, assegurança. Etc...) i per c_b (cost de la bateria).

$$Z_M = c_{t1} \sum_{i=1}^N \left(M^1(i)h(i) + (M_{IN}^1(i) + M_{OUT}^1(i)) \frac{l_G}{v(i)} \right) + c_{t1} (M_{OUT}^1(N+1)) \frac{l_G}{v(N)} + (c_{t2} + c_b) M_T (h_{DAY} + h_{NIGHT}) \quad (33)$$

El cost de la distancia, calculat a l'equació (34) es calcula d'una manera similar al cost temporal. Es fa una estimació de la distancia recorreguda durant el servei, la distancia entre els carregadors i cotxera i la ruta de bus.

$$Z_V = c_d \sum_{i=1}^N \left(\frac{2L}{H_i} h(i) + (M_{IN}^1(i) + M_{OUT}^1(i)) l_G \right) + c_d (M_{OUT}^1(N+1)) l_G \quad (34)$$

Finalment, el cost de la infraestructura es calcula a l'equació (35). Els paràmetres c_{CG} i c_{CO} tenen en compte el capital i el cost operatiu de les plataformes de càrrega a cotxera i al carrer, respectivament. Al cas de carregadors al carrer, el terme $\frac{2L}{dc(i)}$ és el nombre de carregadors a cada volta i $N_{ch,S}$ el nombre de plataformes necessàries per evitar irregularitats al servei.

$$Z_C = c_{CO} N_{ch,S} \max_{i=1, \dots, N} \frac{2L}{d_c(i)} + c_{CG} (N_{ch,N} + N_{ch,D}) \quad (35)$$

6. MODELITZACIÓ D'UNA XARXA DE BUS

En aquest apartat es posarà en practica la metodologia explicada anteriorment per veure la viabilitat de diferents tipus de xarxes de bus i el seu cost, realitzant una comparativa. Es crearà una xarxa comuna, des de la qual s'analitzaran els diferents models, definint unes variables. Després s'establiran uns paràmetres, que seran diferents a cada model, i amb els quals s'executarà el model. Anomenarem a aquesta línia de bus G12.

La longitud de la línia G12 serà de 16 km, amb dos estacions de càrrega a les últimes parades a una distancia de 1,5 km. La primera parada estarà situada a 3 km de cotxera. La distancia entre parades l'assumirem constant al llarg de la línia i serà de 0,4 km.

El temps addicional degut a acceleració i desacceleració serà de 19 segons, és a dir, 0,005277 hores. I el temps de pujada per passatger l'establirem com de 3,5 segons, és a dir, 0,00097 hores.

Taula 3: Característiques de la línia

Variables de decisió	Línia G12
Longitud de la línia, L (km)	16
Distancia entre la primera parada i l'estació de càrrega, l_A (km)	1,5
Distancia entre la última parada i l'estació de càrrega, l_B (km)	1,5
Distancia entre la primera parada i cotxera, l_G (km)	3
Distancia entre parades (km)	0,4
Temps addicional degut a acceleracions i frenada, t (h)	0,005277
Temps de pujada per passatger, t' (h)	0,00097

Després de definir les variables de la línia G12, s'ha de classificar el període temporal, és a dir, decidir el període h_{DAY} en el qual estarà en servei la línia i en quants intervals es divideix aquest període N . Un cop estan aquests dos elements establerts, s'han de delimitar els horaris dels intervals, la velocitat de creuer, el nombre de passatgers per hora i la freqüència. El període h_{DAY} serà de 18 hores i el dividirem en 10 intervals N . La resta de paràmetres és descriuen en la següent taula:

Taula 4: Intervals de la línia

Interval, N	Inici	Final	Velocitat de creuer, v_i (km/h)	Passatgers per hora, Λ_i (pax/h)	Freqüència, H_i (min)
1	0	2	30	400	12
2	2	4	30	600	10
3	4	6	30	1200	8
4	6	7	30	1500	7
5	7	9	30	1400	7
6	9	11	30	1600	7
7	11	12	30	1100	7
8	12	14	30	1100	8
9	14	16	30	700	10
10	16	17	30	300	12

Un cop definit tota la línia de bus, el primer que es pot observar, és que els bus necessaris per cada interval, N estaran distribuïts de la següent manera:

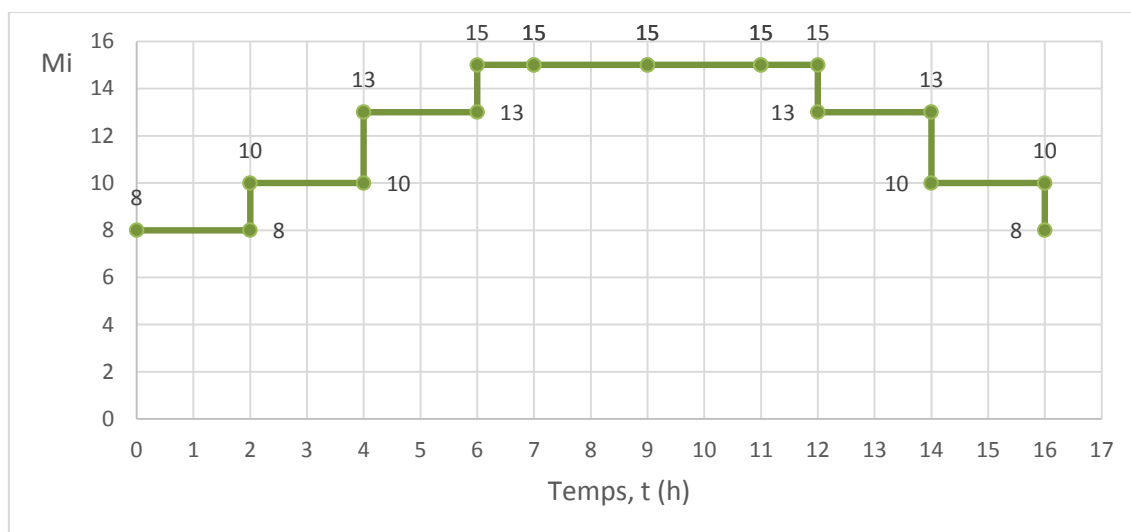


Figura 18: Nombre de vehicles necessaris a cada interval per assolir el servei

Font: Elaboració pròpia

A partir d'aquí, cada model definirà, depenent de les seves característiques, el nombre de la flota de busos necessària per satisfer aquesta distribució.

6.1. Xarxa de bus elèctrica, Model A

Aquest tipus de xarxa serà bus elèctric amb recàrrega a cotxera durant el dia i nit. Per realitzar l'estudi de viabilitat de la línia i dels costos, s'han de definir un paràmetres en relació al tipus de bus, la seva càrrega i el seus costos.

El tipus de bus que s'utilitzarà és l'estàndard 12 metres.

Abans d'entrar a avaluar els costos, s'ha de definir la capacitat de les bateries del bus, E , i el factor de consum energètic, f_c . Sobre la infraestructura elèctrica, s'ha d'establir un temps de càrrega al carregadors ràpids i lents, la hora del dia en la qual es poden començar la recarrega lenta d'aquells vehicles que estan a cotxera i no sortiran més, T_{el} . I per últim, el temps de posicionament a l'estació de recàrrega ràpida, T_{pos} . Aquests valors són els de la següent taula:

Taula 5: Paràmetres del bus estàndard 12 metres

Paràmetres	Estàndard 12 metres
Capacitat de les bateries, E (kWh)	370
Factor de consum energètic, f_c (kWh/veh.km)	1,40
Carregadors ràpids, SD (kWh/min)	7,5
Carregadors lents, SN (kWh/min)	0,84
T_{el}	2
T_{pos}	25

Un cop establerts aquest paràmetres, s'analitzaran els costos. Per fer el càlcul dels costos em de saber els següents factors.

Taula 6: Costos del bus estàndard 12 metres

Paràmetres de costos	Estàndard 12 metres
Cost unitari de distància del vehicle, c_d (€/veh-km)	0,76
Cost unitari temporal del conductor, c_{t1} (€/veh-h)	37,72
Cost unitari temporal del vehicle, c_{t2} (€/veh-h)	16,46
Cost unitari temporal de la bateria, c_b (€/kWh-h)	0,0124
Adquisició del vehicle (€/veh)	500.000

Cada cost unitari engloba diferents tipus de costos. El cost unitari de distància està compost pel cost de l'energia (€/veh-km) i pel cost del manteniment (€/veh-km). El segon tipus de cost té en compte les despeses del vehicle en servei, però des del punt de vista del conductor, és a dir, dietes i sou, principalment. El tercer tipus, c_{t2} , està format pel cost de l'amortització del vehicle, del treball de recàrrega a cotxera i de les assegurances, control i el staff d'enginyers. I el quart i últim cost, té en consideració el cost d'instal·lació i el manteniment de l'estació de càrrega.

Es restringirà, també, que l'estat de càrrega sigui com a mínim del 20%.

Amb tots aquests valors definits, realitzem el càlcul. En aquest primer càlcul, els nous vehicles poden ser introduït al servei abans que s'acabi la bateria dels vehicles en servei, és a dir, que els vehicles que estan en servei es poden retirar abans que s'esgoti la seva bateria. Això provocarà que hi hagi un número més baix de busos.

La restricció principal per aquest model A és la restricció energètica, que es compleix a cada interval definit.

Els primers resultats que obtenim, són en relació a la infraestructura i a la mida de la flota de busos per fer servei en la línia G12.

Taula 7: Resultats infraestructura

Nombre d'estacions de càrrega diürnes	1
Nombre de servidors les estacions diürnes	1
Nombre de carregadors nocturns	11
Mida de la flota de bus	19

Per últim, dels resultats obtinguts obtindrem diferents valors que es multiplicaran per els diferents coeficients dels costos per obtenir el cost total de la xarxa.

El primer valor que aconseguim representa al temps, en hores, de bus amb conductor, és a dir, temps que s'haurà de pagar el sou i l'assegurança del conductor. Aquest nombre d'hores serà de 211 hores i aquest temps s'haurà de multiplicar per el coeficient c_{t1} .

El segon nombre, 456 hores, equival al temps del vehicle, amb conductor (en servei) i a sense conductor (a cotxera) durant tot el h_{DAY} . Aquest valor s'haurà de multiplicar pel coeficient c_{t2} .

Per últim, tenim el nombre de kilòmetres recorreguts per tota la flota al llarg del dia, 4.003,7 kilòmetres, incloent els viatges a cotxera. Aquest, es multiplicarà per el cost unitari de distancia del vehicle, c_d .

Els tres costos sumats i afegint el cost de les bateries serà el cost total final.

Taula 8: Resultats costos model A1

ZM (€/dia)	15.464,7 €
ZV (€/dia)	3.042,8 €
ZC (€/dia)	303,4 €
Zbat (€/dia)	2.092,1 €
Ztot (€/dia)	20.903,0 €

Dins d'aquest mateix model A i amb els mateixos paràmetres, es realitza una variació, ara els nous vehicles no es poden introduir fins que els vehicles que estan en servei es quedin sense bateria. Aquesta variació provocarà que hi hagi una mida de flota més elevada.

En aquesta variació, el nombre de bus augmentarà fins a 23 i el cost final haurà augmentat. Els resultats obtinguts seran els següents.

Taula 9: Resultats costos model A0

ZM (€/dia)	17.029,8 €
ZV (€/dia)	3.033,7 €
ZC (€/dia)	303,4 €
Zbat (€/dia)	2.532,6 €
Ztot (€/dia)	22.899,4 €

6.2. Xarxa de bus elèctrica, Model B

Aquest model B és el corresponent a la recàrrega ràpida al carrer, *opportunity charging*, més recàrrega nocturna a cotxera. Es treballa amb la mateixa línia de bus G12.

En aquest tipus de model es tenen en compte dos tipus de configuracions, depenen de si tenim carregador a final de parada o no. És a dir, tindrem la configuració N-0, on només hi ha un carregador a la primera parada de la línia, i la configuració N-N, on hi ha carregador a inici i final de trajecte.

Igual que en el cas anterior, el bus que s'utilitzarà és l'estàndard 12 metres.

En aquest cas, tindrem la mateixa configuració de tipus de bus i els mateixos paràmetres de costos, que en el model A, taula 10.

Taula 10: Característiques i paràmetres del bus estàndard 12 metres

Paràmetres	Estàndard 12 metres
Capacitat de les bateries, E (kWh)	370
Factor de consum energètic, f_c (kWh/veh.km)	1,40
Carregadors ràpids, SD (kWh/min)	7,5
Carregadors lents, SN (kWh/min)	0,84
T_{el}	2
T_{pos}	25
Paràmetres de costos	
Cost unitari de distancia del vehicle, c_d (€/veh-km)	0,76
Cost unitari temporal del conductor, c_{t1} (€/veh-h)	37,72
Cost unitari temporal del vehicle, c_{t2} (€/veh-h)	16,46
Cost unitari temporal de la bateria, c_b (€/kWh-h)	0,0124
Adquisició del vehicle (€/veh)	500.000

Amb aquests valors establerts, es realitza el càlcul. Es distingirà, com s'ha dit abans entre els dos tipus de configuracions.

En aquest cas, també es restringirà que l'estat de carrega sigui com a mínim del 20%.

6.2.1. Configuració N-0

Per el primer càlcul, es definirà que els busos es poden saltar la càrrega, és a dir, si tenen suficient bateria per continuar amb el servei i arribar fins a la pròxima càrrega, es poden saltar la operació de càrrega.

El primer que podem observar, és que la restricció de l'energia, que en aquest cas ve donada per si el tipus de configuració de càrrega és suficient per complir el servei, és positiva, per tant es pot duu a terme aquest tipus de xarxa.

Podem observar que la flota és lleugerament inferior al model A. Ja que els vehicles poden carregar-se durant el servei, es pot reduir el nombre de busos.

Taula 11: Resultats infraestructura

Nombre d'estacions de càrrega diürnes	1
Nombre de servidors les estacions diürnes	2
Nombre de carregadors nocturns	12
Mida de la flota de bus	17

En aquest cas, el nombre de hores de servei amb conductor és de 219,8 hores. el nombre d'hores del bus durant el dia, a cotxera (sense conductor) i en servei (amb conductor) serà de 408 hores. Per últim, els kilòmetres recorreguts per tota la flota al final del dia, tenint en compte els desplaçaments fins a les estacions de càrrega i a cotxera, serà de 3.967,7 kilòmetres.

El cost fraccionat i total d'aquest model de xarxa està resumit a la següent taula.

Taula 12: Resultats costos model B1

ZM (€/dia)	15.006,5 €
ZV (€/dia)	3.015,5 €
ZC (€/dia)	410,8 €
Zbat (€/dia)	1.871,9 €
Ztot (€/dia)	20.304,7 €

El següent càlcul es canviant la condició, els busos ara no es podran saltar les estacions de càrrega. Això provocarà un augment del temps mort, encara que no augmenti el nombre de busos de la flota, augmentarà els temps d'usos i els kilòmetres recorreguts, per tant el preu final també serà superior.

Taula 13: Resultats costos model B0

ZM (€/dia)	15.557,2 €
ZV (€/dia)	3.006,3 €
ZC (€/dia)	214,8 €
Zbat (€/dia)	1.871,9 €
Ztot (€/dia)	20.650,3 €

6.2.2. Configuració N-N

En aquesta configuració tindrem estació de càrrega a inici i final de recorregut, per tant les operacions de càrrega seran més constants. El resultat, com en el cas anterior, ens dona que es viable realitzar aquesta configuració de xarxa, ja que es suficient el tipus de recarrega per duu a terme el servei.

Per el primer càlcul, es defineix que es pot saltar franges sense carregar.

En aquest cas, s'haurà de tenir un bus més que en l'altre tipus de configuració, és a dir 18. Amb aquesta configuració, hi hauran dos estacions de càrrega, a inici i final de trajecte, amb un carregador per estació.

Taula 14: Resultats infraestructura

Nombre d'estacions de càrrega diürnes	2
Nombre de servidors les estacions diürnes	1
Nombre de carregadors nocturns	13
Mida de la flota de bus	18

El nombre d'hores dels conductors al bus, el del bus a cotxera o en servei i els kilòmetres recorreguts, els tres termes, seran, lleugerament, superiors a la configuració N-0. Per tant el preu final, serà, també, superior.

Taula 15: Resultats costos model B1

ZM (€/dia)	15.673,2 €
ZV (€/dia)	3.354,4 €
ZC (€/dia)	430,4 €
Zbat (€/dia)	1.982,0 €
Ztot (€/dia)	21.439,9 €

Canviem també amb aquesta configuració la condició de saltar-se estacions de càrrega i, com en el cas anterior, el nombre de busos es manté constant, però, els temps de ús dels busos i els kilòmetres augmenten, i per tant, el cost també.

Taula 16: Resultats costos model B0

ZM (€/dia)	16.457,7 €
ZV (€/dia)	3.564,4 €
ZC (€/dia)	214,8 €
Zbat (€/dia)	1.982,0 €
Ztot (€/dia)	22.219,1 €

6.3. Xarxa de bus dièsel.

En aquest apartat, es realitzarà una modelització de la línia de bus G12 aplicant un model de bus dièsel, amb el mateix model que s'utilitza per el càlcul dels altres modes de xarxa, A i B.

Aquesta modelització té el mateix procediment que el model A, és a dir, els busos es recarreguen, en aquest cas, s'emplenen els dipòsits, durant el dia i la nit a cotxera. No hi ha estacions de càrrega al carrer.

El principal canvi que s'haurà de realitzar per poder simular aquets dièsel és que la capacitat energètica del bus haurà de ser molt superior a la dels busos elèctrics. Una altre diferencia és que no existeix la càrrega a carrer, és a dir, que els busos només poden ser proveïts de combustible a cotxera.

Es realitza una simulació amb el model elèctric però ajustant els valors a un bus ICE, dièsel.

Taula 17: Característiques bus dièsel

Paràmetres	Estàndard 12 metres
Capacitat de les bateries, E (kWh)	1000
Factor de consum energètic, f_c (kWh/veh.km)	0,61
Carregadors ràpids, SD (kWh/min)	1000
Carregadors lents, SN (kWh/min)	1000
T_{el}	2
T_{pos}	25

Els paràmetres dels costos també s'han d'ajustar al tipus de bus dièsel.

Taula 18: Paràmetres de costos del bus dièsel

Paràmetres de costos	Estàndard 12 metres
Cost unitari de distancia del vehicle, c_d (€/veh-km)	1,51
Cost unitari temporal del conductor, c_{t1} (€/veh-h)	37,72
Cost unitari temporal del vehicle, c_{t2} (€/veh-h)	14,47
Cost unitari temporal de la bateria, c_b (€/kWh-h)	0
Adquisició del vehicle (€/veh)	250.000

El cost del el carregadors ràpids serà zero, ja que no existeix aquest tipus de càrrega. El cost de l'estació de carga amb combustible és bastant més cara que una estació elèctrica, però en canvi, pot carregar de combustible a 350 vehicles al dia. Per calcular el cost de l'estació de combustible utilitzarem la fórmula $c_{RF} = \frac{577.2}{200} M_T$, on M_T és el nombre de busos dièsls necessaris per proveir el servei.

Per saber aquest M_T , es realitzarà un procés iteratiu, tenint en compte el valor trobat als models anterior, començarem amb 18 busos. Realitzant tot el càlcul el resultat ens dona de 15 busos. Tornem el fer tot el procediment amb 15 busos. El resultat ens dona 15 busos un altre cop, per tant, ens quedem amb aquest nombre de busos, el qual el $c_{RF} = 43,29$.

Amb tots els valors establerts, realitzem el càlcul final per saber el cost total.

Taula 19: Resultats infraestructura

Nombre d'estacions de càrrega diürnes	1
Nombre de servidors les estacions diürnes	1
Nombre de carregadors nocturns	1
Mida de la flota de bus	15

Només es necessita un carregador nocturn, ja que cada un té capacitat per molts busos alhora. La mida de la flota és molt baixa, ja que cada bus té molta capacitat per fer el servei. Es necessitaran el mateix nombre de bus que es necessita a la franja horària més elevada, 15.

El preu total d'aquest tipus de xarxa és de 19.384,3 € i està fraccionat d'acord amb la següent taula.

Taula 20: Resultats costos

ZM (€/dia)	13.092,7 €
ZV (€/dia)	6.248,3 €
ZC (€/dia)	43,3 €
Zbat (€/dia)	0,0 €
Ztot (€/dia)	19.384,3 €

La taula a continuació és una taula resum dels resultats obtinguts dels diferents tipus de xarxes de bus.

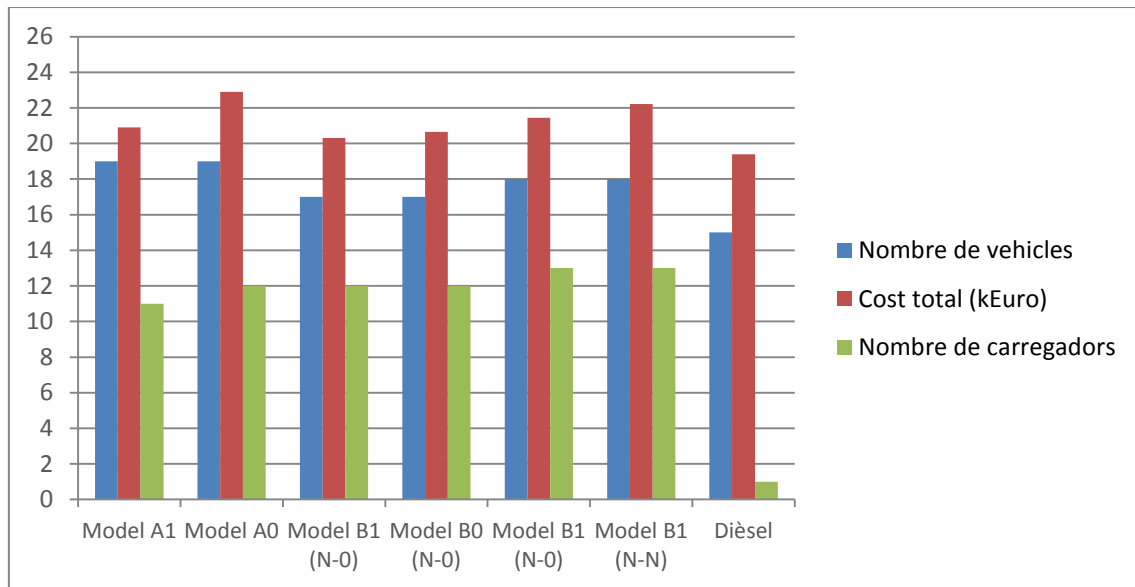


Figura 19: Comparativa del nombre de vehicles, costos i nombre de carregadors necessaris dels diferents models

Font: Elaboració pròpia

A la figura 19, podem veure clarament, que el model, per la línia de bus G12, més barat és el model que és més comú actualment, el de bus dièsel. També, per la seva capacitat de càrrega, el nombre de vehicles de la flota és el més baix, ja que el busos elèctrics en comparació als dièlsels no tenen tanta autonomia.

7. APLICACIÓ A LES LÍNIES H16 I V13 DE BARCELONA

Un cop aplicat el model a una línia de bus definida per nosaltres, aplicarem el model a dos línies reals de Barcelona, amb les dades reals. Primer es farà el càlcul i es buscarà el model òptim per cada línia, tenint en compte la capacitat dels autobusos que tenim per cadascuna. Per la H16 disposem d'un articulat 18 metres amb una capacitat de 150kWh i per la V13 es disposa d'un autobús estàndard de 12 metres amb una capacitat de 370 kWh.

Es farà un estudi dels costos amb els diferents models de xarxa i amb diferents bateries intentant optimitzar el valor de energia i el cost. També s'estudiarà la xarxa amb els busos dièlsels, per poder fer una comparativa. Es realitzarà el model amb diferents capacitat de les bateries, començarem per 50 kWh fins a 400kWh.

El tipus de bus per cada línia és diferent, om s'ha dit abans, per la H16 s'utilitzarà un bus articulat de 18 metres i per la V13 un bus estàndard de 12 metres. Els costos de cada tipus de bus està especificat a la següent taula.

Taula 211: Paràmetres de costos dels diferents tipus de bus

Paràmetres de costos	Estàndard 12 metres		Articulat 18 metres	
	Elèctric	Dièsel	Elèctric	Dièsel
Cost unitari de distancia del vehicle, c_d (€/veh-km)	0,76	1,51	0,83	1,82
Cost unitari temporal del conductor, c_{t1} (€/veh-h)	37,72	37,72	37,72	37,72
Cost unitari temporal del vehicle, c_{t2} (€/veh-h)	16,46	14,47	19,14	15,40
Cost unitari temporal de la bateria, c_b (€/kWh-h)	0,0124	0	0,0124	0
Adquisició del vehicle (€/veh)	500.000	250.000	790.000	350.000

7.1. Línia H16

La línia H16 és la primera línia de Barcelona que incorpora un bus elèctric. El recorregut va des del Passeig Zona Franca fins al Fòrum Campus Besòs, a la figura 18 veiem les parades. Les estacions de recàrrega en carrer, estan situades a les últimes parades del recorregut, que són Plaça del Nou i UPC-Campus Diagonal Besos.

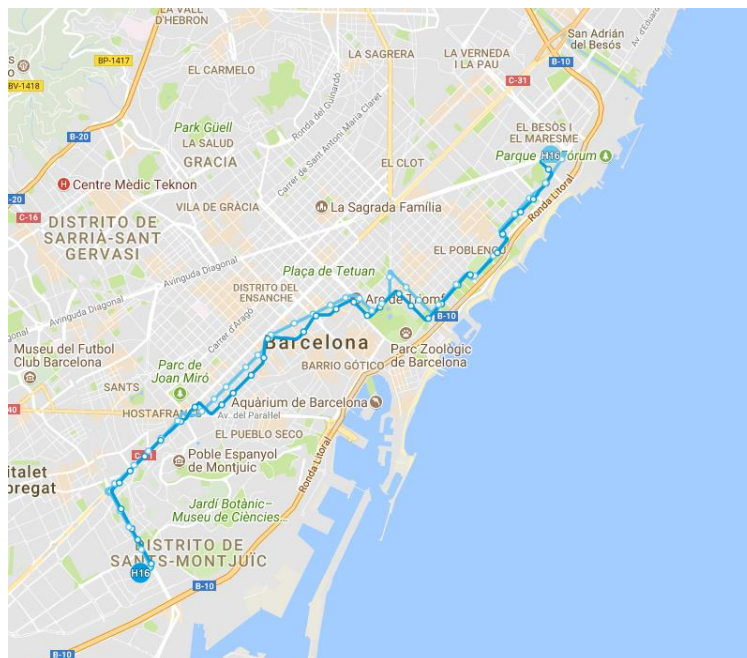


Figura 20: Recorregut de la línia H16

Font: TMB

La longitud del recorregut és de 12,914 km i la distància entre parades s és de 0,358 km. La distància entre cotxera i la primera parada de la línia és de 3,535 km. Aquesta línia està en funcionament 17 hores al dia, i es fa un interval de temps per cada hora. Les dades de velocitats, passatgers i freqüència es recullen a la següent taula.

Taula 222: Distribució dels intervals de servei de la xarxa H16

Interval, N	Inici	Final	Velocitat de creuer, v_i (km/h)	Passatgers per hora, Λ_i (pax/h)	Freqüència, H_i (min)
1	0	1	25,2	104,25	14
2	1	2	25,2	373,563	10
3	2	3	25,2	1217,63	8
4	3	4	25,2	1619,88	8
5	4	5	25,2	1310,81	7
6	5	6	25,2	1219,56	7
7	6	7	25,2	1224,13	7
8	7	8	25,2	1272,56	7
9	8	9	25,2	1391,56	7
10	9	10	25,2	1517,69	7
11	10	11	25,2	1417,25	7

12	11	12	25,2	1468,25	8
13	12	13	25,2	1776,63	8
14	13	14	25,2	1613,56	8
15	14	15	25,2	1425,88	7
16	15	16	25,2	1259,13	7
17	16	17	25,2	878	10

Amb aquestes dades de la xarxa, el nombre de busos necessaris per cada interval queda distribuït com a la figura 21.

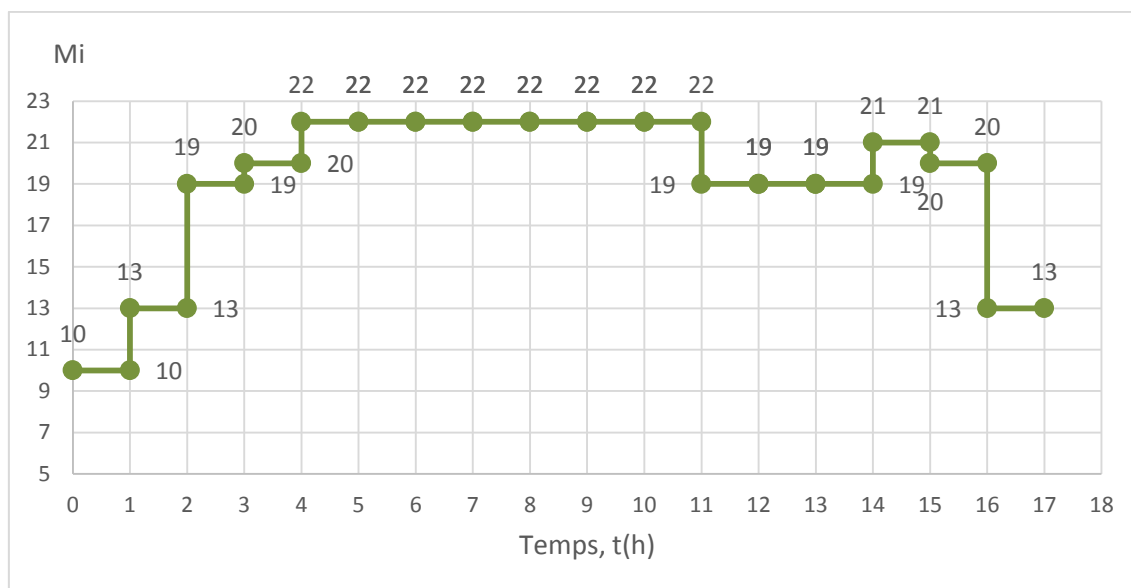


Figura 21: Distribució dels vehicles necessaris per cada interval de temps

Font: Elaboració pròpia

Amb les característiques de la línia, podem observar que necessitarem com a màxim 22 busos en servei alhora i com a mínim 10. Amb aquests números de busos, depenent del model que apliquem, necessitarem més o menys busos.

Per cada model, com s'ha dit abans, es farà una progressió de la mida de la capacitat de les bateries i una comparativa final. Però, abans de aplicar els diferents models, definim, per tots els casos igual, que el temps addicional degut a acceleracions i desacceleracions serà de 18,36 segons i que el temps que triga un passatger a pujar al autobús és de 2,88 segons.

Pel que fa als busos elèctrics, el factor de consum energètic, en aquest cas, per l'articulat 18 metres serà de 1,9 kWh/veh-km. La velocitat de càrrega dels carregadors ràpids serà de 7,5 kWh i dels carregadors lents, a cotxera, serà de 0,83 kWh.

7.1.1. Resultats reals

Per trobar els resultats, com s'ha dit abans, la bateria de la que es disposa és de 150kWh de capacitat. S'aplicaran els diferents models amb aquesta bateria, per determinar el model òptim.

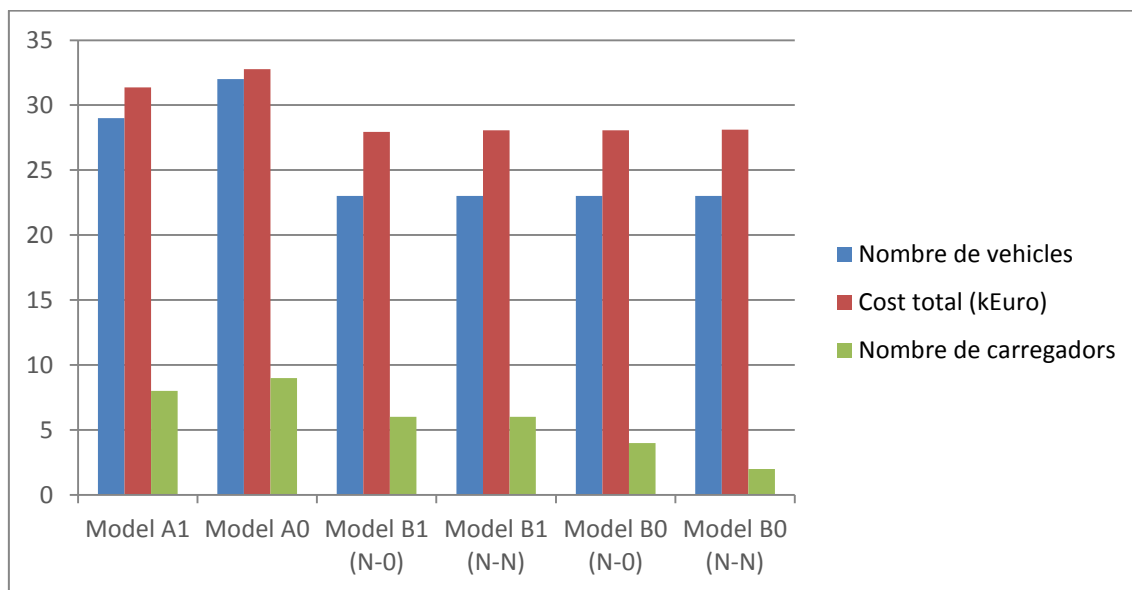


Figura 22: Comparativa dels resultats obtinguts dels diferents models de recàrrega

Font: Elaboració pròpia

Com podem veure a la figura 22, el model més competitiu és el model B1 amb la configuració N-0. Ambdós models A, tenen un cost molt més elevat ja que la mida de la flota de la que s'ha de disposar és molt elevada.

7.1.2. Anàlisi de sensibilitat de les diferents capacitats de les bateries per el model A

Aquest tipus de xarxa correspon a la càrrega durant el dia i la nit a cotxera, per tant la distancia de cotxera fins a la primera parada de la línia és un factor molt important. Com s'ha explicat i aplicat amb anterioritat, hi ha una variable de decisió amb la qual es calcula i s'ha d'aplicar el model en els dos casos, que és, si es poden introduir els vehicles nous abans que s'esgoti la bateria dels que estan en servei o no.

Del primer cas d'estudi, és a dir, és possible introduir els vehicles en servei abans que s'esgoti la bateria (model A1), obtenim els següents resultats.

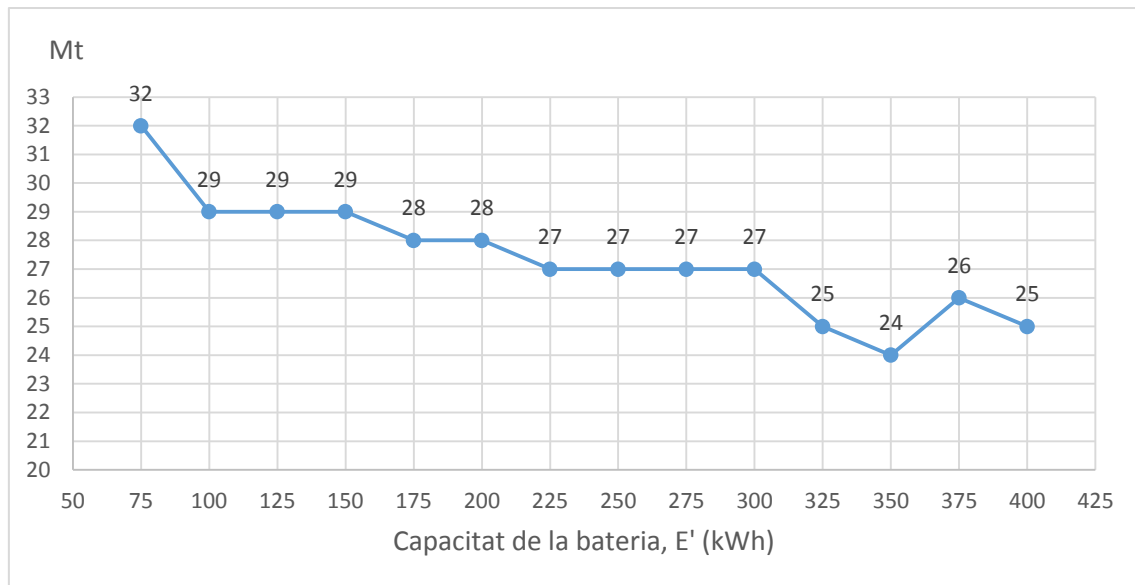


Figura 23: Vehicles, Mt, necessaris per cada capacitat de la bateria

Font: Elaboració pròpia

Podem observar a la figura 23, que el nombre de vehicles que es necessiten es redueix segons la mida de la bateria, ja que a més capacitat, més temps de recorregut, per tant, menys busos. Observem que el valor màxim de busos es quan la capacitat de la bateria pren el valor mínim, ja que provocarà que els busos tinguin menys temps de recorregut. Podem observar també, que després d'assolir el valor mínim, a 350 kWh, el nombre de busos torna a augmentar, això es degut a que amb unes bateries més grans, el temps de recarrega és més elevat.

Per tant, s'ha de trobar un equilibri entre el temps que es trigarà en carregar i l'autonomia del vehicle. Com que el cost ZM és el que depèn del nombre total de vehicles en servei i és el que fa l'aportació més elevada al cost total, coherentment, el cost més elevat el trobarem quan la capacitat de la bateria és de 75 kWh i el cost més baix quan és de 350 kWh. En el gràfic a continuació podem observar els diferents costos totals.

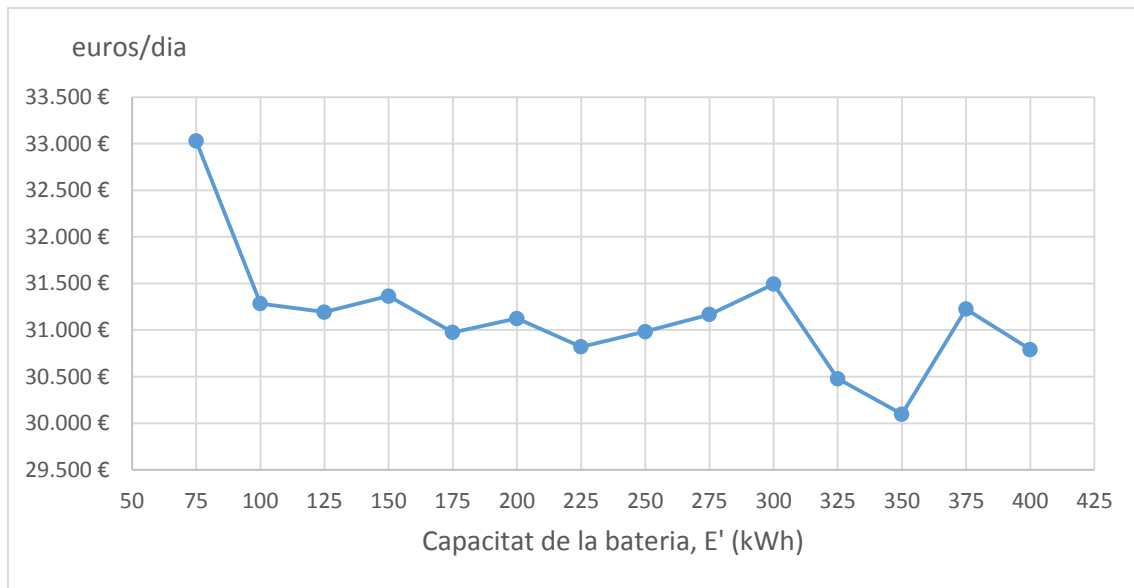


Figura 24: Costos del model per cada capacitat de bateria diferent

Font: Elaboració pròpia

Per últim, trobem el nombre de carregadors necessaris per poder assolir aquestes flotes. En el gràfic següent podem veure com el nombre de carregadors augmenta, casi de forma lineal, fins a mantenir-se constant. A més vehicles, més carregadors són necessaris.

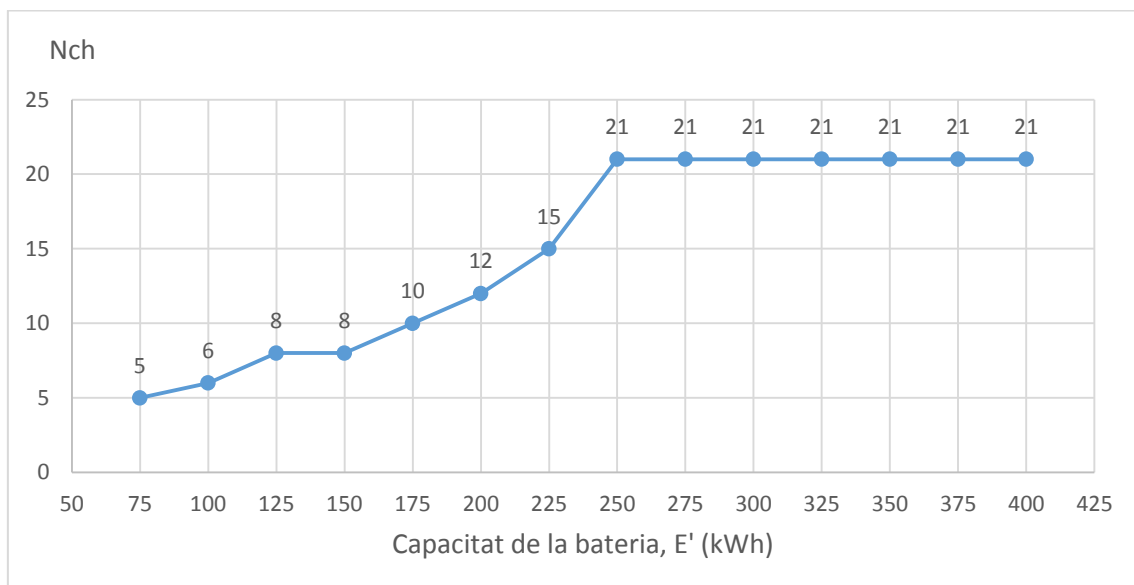


Figura 25: Nombre de carregadors necessaris

Font: Elaboració pròpia

Quan restringim l'entrada de busos al servei fins que s'esgoti la bateria dels que estan en ús (model A0), tots els valors, la mida de flota i els costos augmenten, ja que es necessitaran més vehicles ja que no es poden solapar serveis. Això es pot comprovar als gràfics següents.

La forma de les funcions de nombre de vehicles i de cost total són molt similars, però, pel segon model (A0) hi ha més busos i més cost.

El nombre de carregadors, per la seva part, es quasi igual en els dos casos.

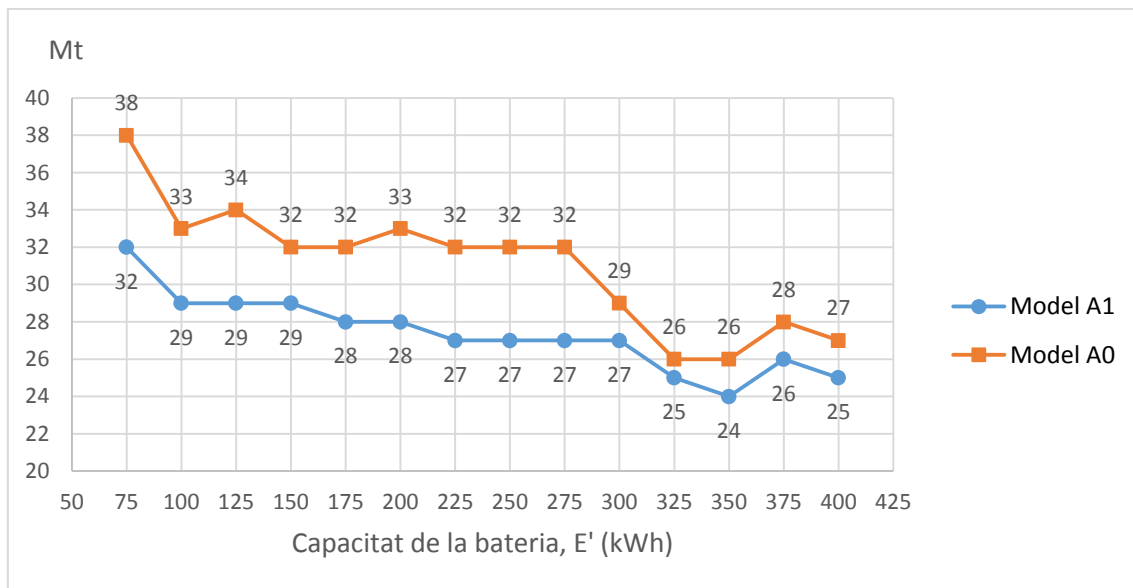


Figura 26: Mida de la flota dels model A1 i A0

Font: Elaboració pròpia

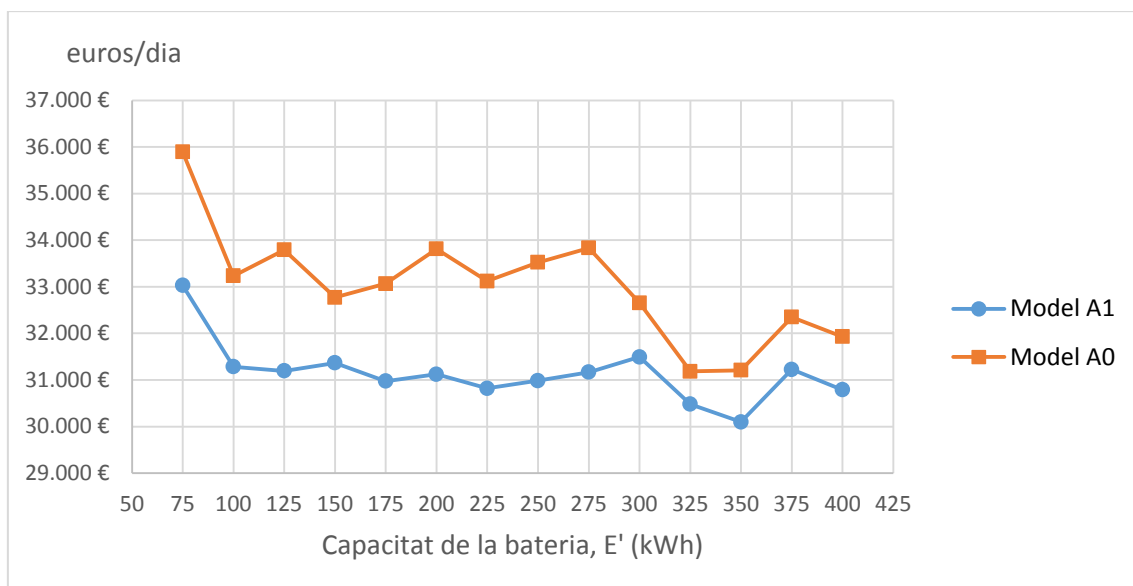


Figura 27: Costos totals dels models A1 i A0

Font: Elaboració pròpia

La conclusió que podem treure, és que per el model A de xarxa de bus, el valor òptim de la capacitat de la bateria, és 350 kWh, ja que per els dos models, la mida de la flota i el cost més baix estan situats en aquest valor.

La mida de la flota per aquest valor de la bateria és de 24 i 26 busos, respectivament i els costos 30.098,0 i 31.207,8 euros/dia. En la subdivisió dels costos, taula 24, es pot veure com els preus són bastant similars entre ells, i la diferencia més gran es troba a ZM i Zbat.

Taula 233: Resultats de costos dels models A1 i A0

	Model A1	Model A0
ZM (€/dia)	23.729,5 €	24.637,6 €
ZV (€/dia)	3.027,4 €	3.021,6 €
ZC (€/dia)	851,3 €	851,3 €
Zbat (€/dia)	2.489,8 €	2.697,2 €
Ztot (€/dia)	30.098,0 €	31.207,8 €

7.1.3. Anàlisi de sensibilitat de les diferents capacitats de les bateries per el model B

En aquest cas, el model B, que correspon al *opportunity charging*, recàrrega en carrer durant el dia, i a cotxera durant la nit, tenim dos configuracions diferents, amb carregador només a una capçalera (N-0) i carregador a les dues capçaleres (N-N). Existeix la variable de decisió, amb la qual hi ha dos càlculs diferents per cada configuració, la qual permet saltar-se una operació de càrrega (1) o no permet saltar-se cap (0).

Igual que en el model A, es buscarà el valor òptim de la capacitat de les bateries per cada un dels casos d'aquest model.

Dins del primer cas (1), podem observar que el nombre de vehicles a la flota, per els dos tipus de configuració, N-0 i N-N, és quasi bé igual al nombre màxim de busos que necessitem en un interval de temps, que és 2. Ja que el fet de carregar els busos a cada volta de recorregut, provoca que la mida de la flota sigui molt baixa. Per els valors de la capacitat de les bateries des de 75 fins a 275 tindrem 23 busos, i a partir de llavors amb els 22 hi ha suficient.

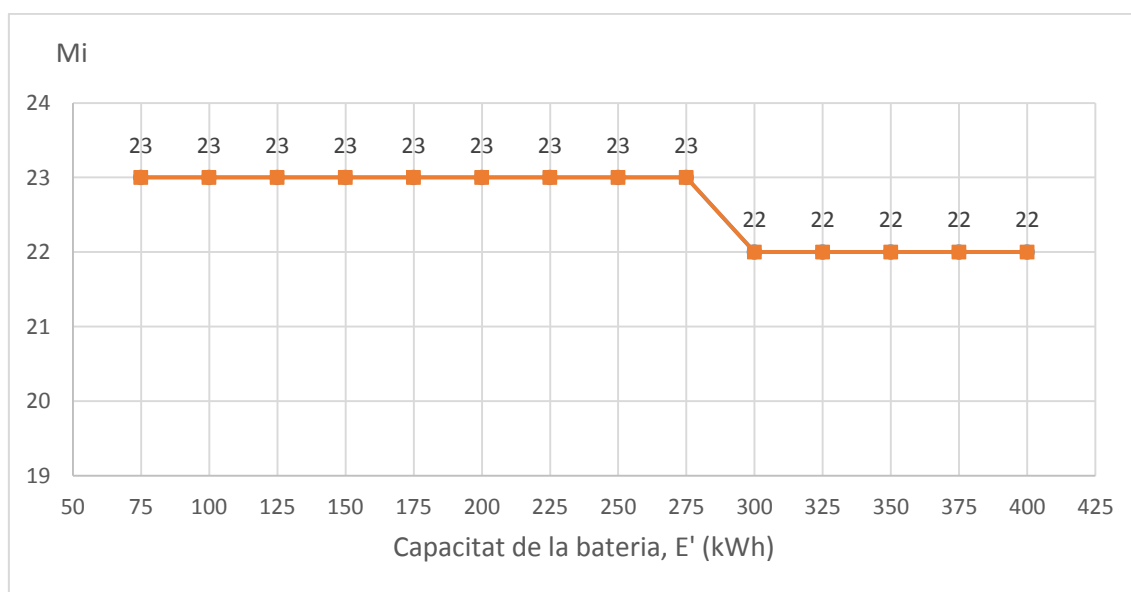


Figura 28: Vehicles necessaris en funció de les diferents capacitats de les bateries

Font: Elaboració pròpia

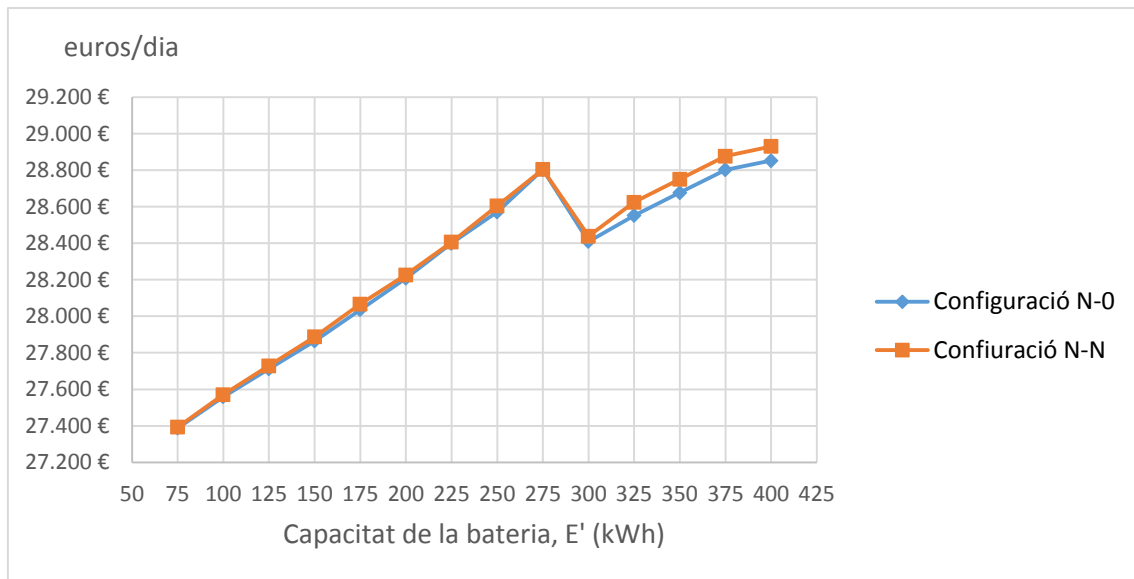


Figura 29: Cost total del les diferents configuracions del model B1

Font: Elaboració pròpia

Pel que fa als costos, si hi ha diferencia entre les dues configuracions. tindrem els valors dels costos, gràfic anterior, per cada configuració i per cada valor de la capacitat de les bateries. Com que el nombre de busos és igual o quasi igual per cada capacitat el cost varia, principalment, pel cost de les bateries, per tant la opció òptima serà amb bateries de 75 kWh.

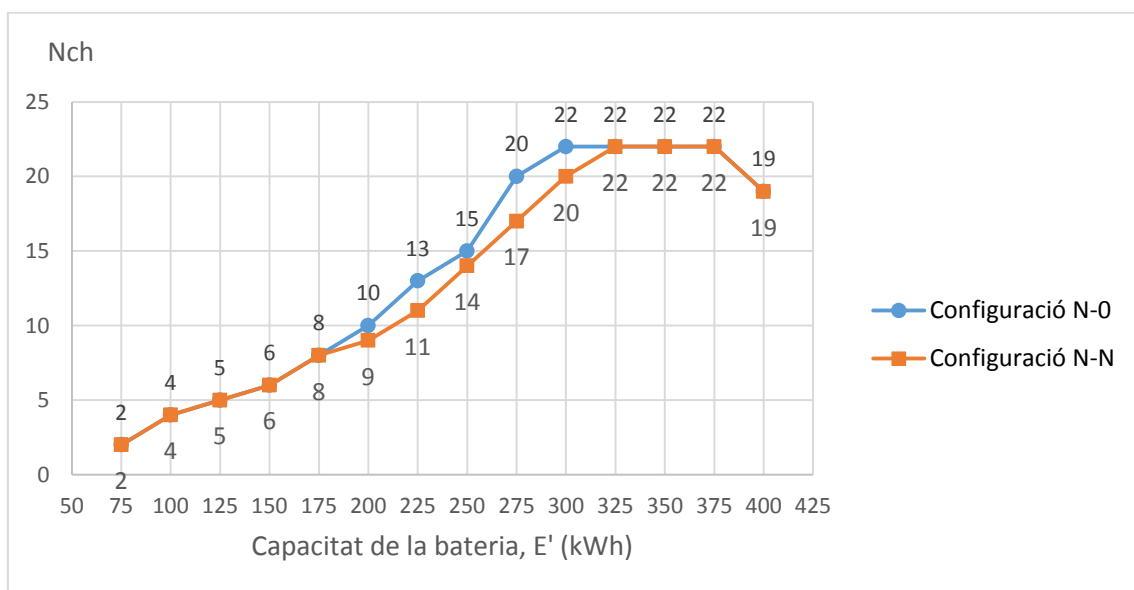


Figura 30: Nombre de carregadors necessaris en funció de les diferents capacitats

Font: Elaboració pròpia

Per últim, el nombre de carregadors que s'hauran d'instal·lar al carrer serà de 1 plataforma de càrrega amb dos carregadors en el cas de la configuració N-0 i 2 plataformes amb un carregador cadascuna en la configuració N-N. A cotxera en canvi, el nombre de carregadors depèn principalment de dos factors, el nombre de vehicles i la capacitat de les bateries. En

aquest cas, el nombre de vehicles és igual per tant el factor determinant serà la capacitat de les bateries. Això es pot veure en el gràfic a continuació.

Pel que fa al segon cas (0), el nombre de busos serà constant a tots els casos, 23 busos. Com en aquest model, els busos no es poden saltar les operacions de càrrega, tindran sempre un nivell molt elevat de bateria al arribar a cotxera i això provoca que el nombre de carregadors a cotxera sigui molt baix, de 4 i 2 carregadors per cada configuració, N-0 i N-N, respectivament.

En el apartat de costos, la variació serà molt petita, ja que el cost ZM, ZV i ZC és constant a tots els casos, menys ZM en el cas (1), el que canvia és el Zbat. Podem observar que en el cas (1) hi ha una baixada del cost quan la bateria és de 300 kWh i això es degut a que la mida de la flota passa a ser de 23 a 22 vehicles.

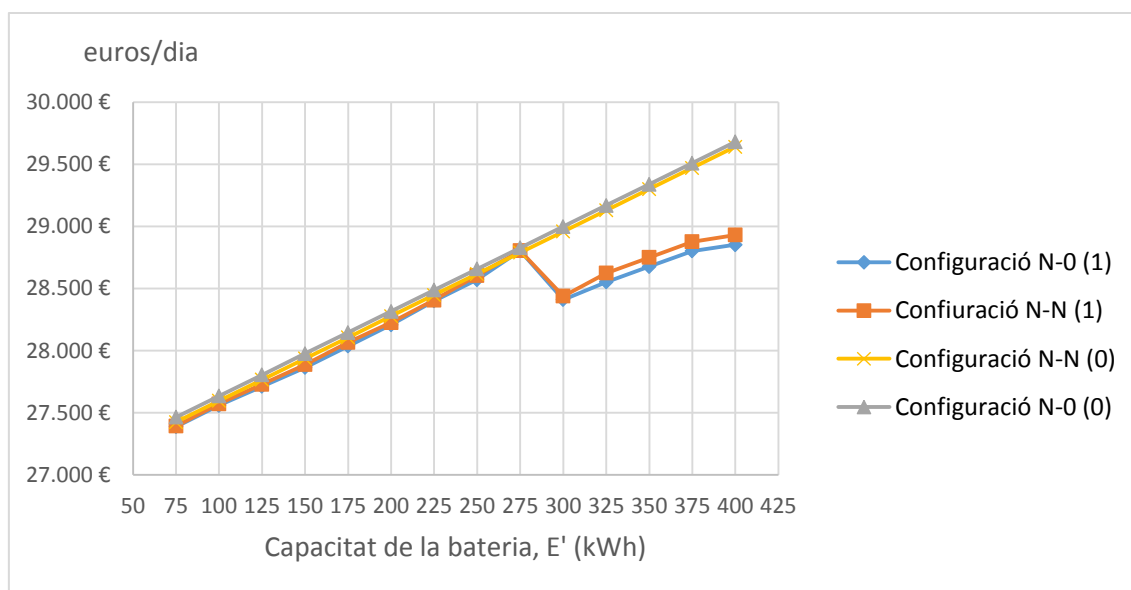


Figura 31: Comparació dels costos totals de les diferents configuracions dels models B1 i B0

Font: Elaboració pròpia

La configuració òptima de cada cas (1) i (0) és diferent. Pel cas (1) la configuració és N-0 i, al contrari, N-N pel cas (0). La capacitat òptima, però, és igual pels dos casos i el seu valor serà de 75 kWh. El nombre de vehicles de la flota és de 23 busos en cada cas.

La subdivisió del costos és la mostrada a la taula 25, i es pot veure que és pràcticament igual als dos casos.

Taula 24: Resultats dels costos dels models B1 i B0 òptims

	Cas (1)	Cas (0)
	Configuració N-0	Configuració N-N
ZM (€/dia)	23.692,4 €	23.730,1 €
ZV (€/dia)	2.968,8 €	2.968,8 €
ZC (€/dia)	214,8 €	214,8 €
Zbat (€/dia)	511,3 €	511,3,2 €
Ztot (€/dia)	27.387,3 €	27.425,0 €

7.1.4. Xarxa de bus dièsel

Per últim, estudiarem els costos de operar aquesta línia amb busos dièsel. Aquest tipus de bus funciona com el model A, els dipòsits dels busos s'emplenen a cotxera. Per realitzar els càlculs, s'han d'ajustar uns paràmetres per simular un bus dièsel.

Els paràmetres dels costos que s'han d'ajustar estan resumits a la taula 22. I els paràmetres relacionats amb l'energia són el factor de consum energètic i la capacitat del dipòsit, que passen a ser 0,8 i 700, respectivament.

Amb aquests nous valors, es calcula el model.

El resultat que obtenim és que necessitem 22 busos a la flota, és a dir, el nombre màxim de busos que es necessita en una franja horària. Això vol dir que els busos tenen energia suficient per cobrir aquestes franges horàries, i que hi ha temps suficient per omplir els dipòsits, ja que la velocitat de càrrega és molt més elevada que en el cas dels busos elèctrics.

Taula 245: Resultats infraestructura

Nombre d'estacions de càrrega diürnes	1
Nombre de servidors les estacions diürnes	1
Nombre de carregadors nocturns	1
Mida de la flota de bus	22

El cost total esta dividit de la següent manera, taula 26. Podem observar com el preu de les bateries és zero, ja que no hi ha. En canvi el cost de la distancia, ZV, és molt elevat, ja que el preu per distancia del busos dièsel és més elevat que els busos elèctrics.

Taula 256: Resultats dels costos

ZM (€/dia)	20.719,6 €
ZV (€/dia)	6.469,9 €
ZC (€/dia)	63,5 €
Zbat (€/dia)	0,0 €
Ztot (€/dia)	27.280,1 €

7.1.5. Comparativa

Agafant el cost total més baix per cada tipus de xarxa, podem observar que el model més econòmic, per poc, segueix sent el actual, dièsel. Les diferències es troben als costos de les bateries i la infraestructura, però en canvi, el cost per distancia és molt més baix.

Taula 267: Comparativa dels costos dels diferents models

	Model A	Model B	Dièsel
ZM (€/dia)	23.729,5 €	23.692,4 €	20.719,6 €
ZV (€/dia)	3.027,4 €	2.968,8 €	6.469,9 €
ZC (€/dia)	851,3 €	214,8 €	63,5 €
Zbat (€/dia)	2.489,8 €	511,3 €	0,0 €
Ztot (€/dia)	30.098,0 €	27.387,3 €	27.280,1 €

7.1.6. Anàlisi de sensibilitat en relació a la distància del carregador en carrer

Agafarem el valor òptim de la capacitat de la bateria per cada model, 350 i 75 kWh. Al model A, que és el de recàrrega a cotxera, no afectarà els diferents valors de l_A i l_B , però a l'altre model si serà un variable determinant.

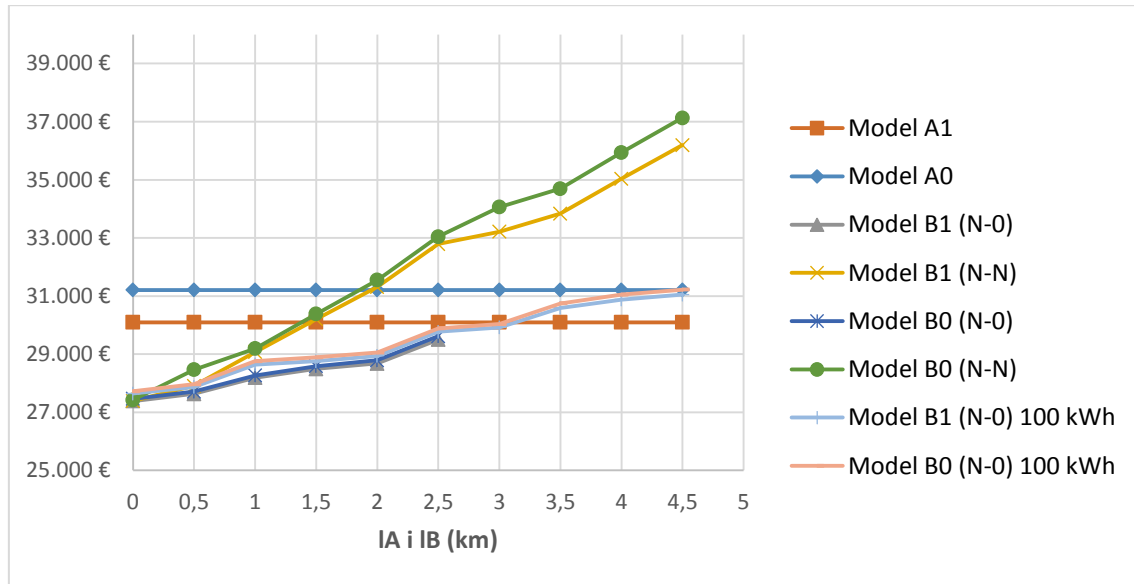


Figura 32: Anàlisi dels costos totals en funció de la distància l_A i l_B

Font: Elaboració pròpia

Com es pot observar, la distància a les estacions de càrrega en carrer no afecta al cost dels models A, ja que han d'anar a cotxera a recarregar. En canvi, pels models B, de recàrrega en carrer, el cost augmenta al mateix temps que augmenta la distància.

Pels casos on la configuració és N-0, quan la distància és superior a 2,5 km, no dona temps a recarregar els vehicles, per tant no es pot duu a terme aquest model. Es canvia la capacitat de la bateria a 100 kWh, per veure l'evolució dels costos a partir dels 2,5 km, i es pot observar, que a partir de 3 km, el model més rentable és el model A1.

Pel que fa a les configuracions N-N, podem veure com si que es poden realitzar, però en el moment en que la distància és superior a 1,5 km, el costos són més elevats a que en els models A.

Aquest anàlisi ens dona un altre punt de vista sobre els diferents models i la seva tria alhora de posar-los en funcionament, ja que no sempre es podrà tenir una estació de càrrega a l'última parada del recorregut.

7.1.7. Anàlisi de sensibilitat de la reducció del preu d'adquisició dels vehicles elèctrics

En aquest apartat es realitzarà l'estudi de quin tant per cent s'hauria de reduir el cost d'adquisició i per tant el cost d'amortització dels vehicles elèctrics. Aquest cost fa variar el cost c_{t2} i per tant el cost total disminuirà.

S'agafaran els valors òptims trobats amb anterioritat per cada model. Pel model A1, el valor òptim de la capacitat de la bateria és de 350kWh i pel model B1, del qual es realitzarà amb la configuració N-0, el valor de la bateria es 75 kWh.

En el gràfic a continuació, podem veure que pel cas del model B1, reduint el cost un 10%, el bus elèctric és competitiu contra el dièsel. En canvi pel model A1, el cost s'haurà de reduir un 70% per poder ser competitiu, que és molt improbable.

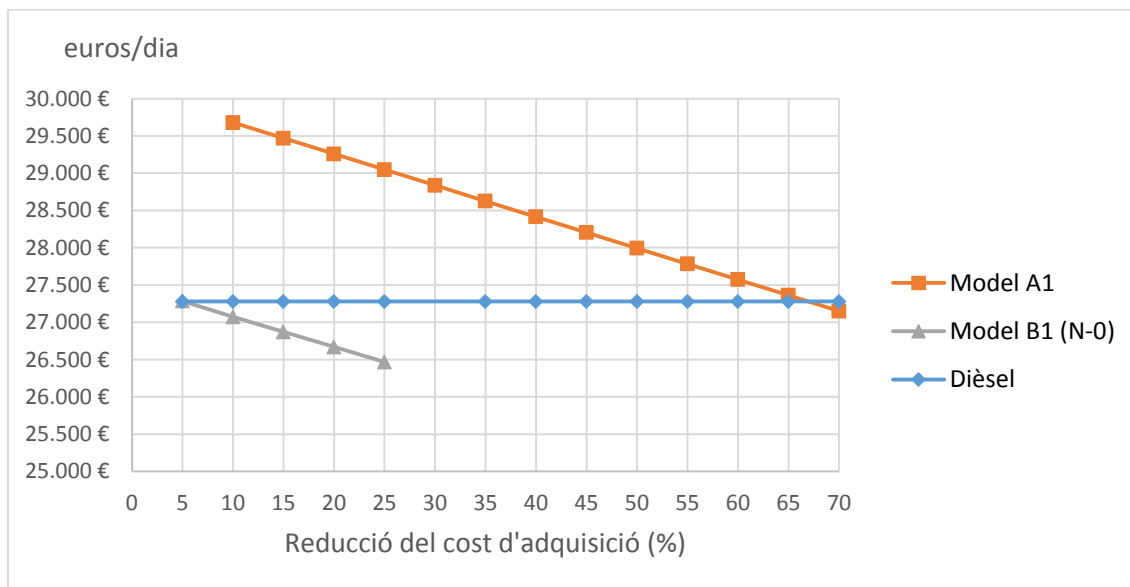


Figura 33: Anàlisi dels costos totals amb la reducció del preu d'adquisició

Font: Elaboració pròpia

7.2. Línia V13

La línia V13 és l'altre línia de Barcelona la qual serà de les primeres amb tenir un servei totalment elèctric en un futur. El recorregut va des de Pla de Palau fins Avinguda Tibidabo. Les últimes parades són Pla de Palau-Metro Barceloneta i Avinguda Tibidabo-Bosch i Alsina. Una d'aquestes parades podrà comptar amb una estació de recàrrega en carrer, però l'altre no.



Figura 34: Recorregut de la línia V13

Font: TMB

La longitud del recorregut és de 8,268 km i la distància entre parades és de 0,367 km. La distància entre cotxera i la primera parada de la línia és de 9,112 km i els kilòmetres que separa la última parada de la línia amb l'estació de recàrrega ràpida en carrer és de 7,574 km.

Taula 278: Distribució dels intervals de servei de la xarxa V13

Interval, N	Inici	Final	Velocitat de creuer, v_i (km/h)	Passatgers per hora, Λ_i (pax/h)	Freqüència, H_i (min)
1	0	1	11,7	166,563	10
2	1	2	11,7	948,063	5,5
3	2	3	11,7	1706,44	5,5
4	3	4	11,7	1330,63	6
5	4	5	11,7	1083,69	6
6	5	6	11,7	1158,75	6
7	6	7	11,7	1198,56	6
8	7	8	11,7	1371,31	6
9	8	9	11,7	1327,06	6
10	9	10	11,7	1254,88	6
11	10	11	11,7	1403,44	6
12	11	12	11,7	1583	6
13	12	13	11,7	1480	6
14	13	14	11,7	1294,44	6
15	14	15	11,7	1031,19	6

16	15	16	11,7	552,75	10
17	16	17	11,7	281,75	15

La xarxa opera 17 hores al dia, i es defineix un interval per cada hora. A la taula 29 podem veure els diferents valors, per interval, de passatgers i freqüència.

El nombre de busos necessaris per operar aquesta línia per interval queda distribuït de la següent manera.

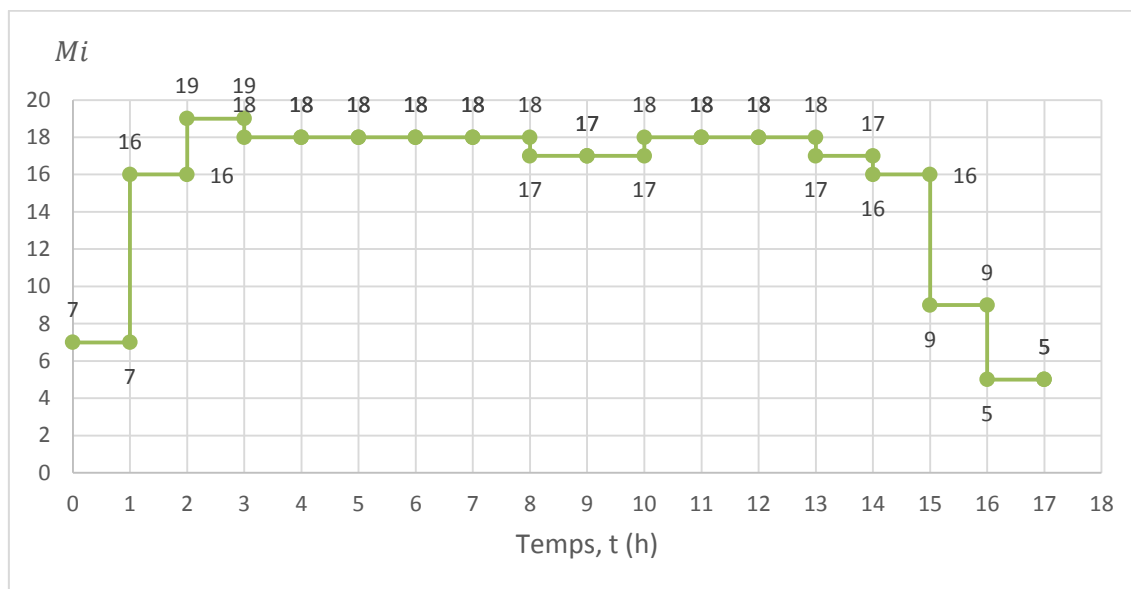


Figura 35: Nombre de vehicles necessaris per cada interval de temps

Font: Elaboració pròpia

En aquesta línia, com podem analitzar, necessitarem com a màxim 19 busos en una franja de servei, i com a mínim 5.

Com en el cas anterior de la línia H16, s'aplicarà el model per diferents valors de la capacitat de les bateries. Definirem per tots els casos, que el temps addicional degut a acceleracions i desacceleracions serà de 18,36 segons i que el temps que triga un passatger a pujar al autobús és de 2,88 segons.

Pel que fa als busos elèctrics, el factor de consum energètic, en aquest cas, per l'estàndard 12 metres serà de 1,4 kWh/veh-km. La velocitat de càrrega dels carregadors ràpids serà de 7,5 kWh i dels carregadors lents, a cotxera, serà de 0,83 kWh.

7.2.1. Resultats

Com s'ha dit anteriorment, per aquesta línia de autobús es disposa d'unes bateries amb una capacitat de 370 kWh. Amb aquestes, es calculen els diferents models per determinar quin és el més òptim en termes de costos i recursos.

Es pot observar, a la figura 36, que en aquest cas, el model més econòmic és el model A1. Encara que el nombre de vehicles és constant a tots els casos, degut a que la bateria té una capacitat tant elevada que no importa quin esquema de recàrrega es faci servir que el nombre de vehicles serà el màxim nombre d'autobusos per poder donar servei a tots els intervals, el que marca la diferencia és el costos del carregadors ràpids i lents. Ja que els ràpids són més cars.

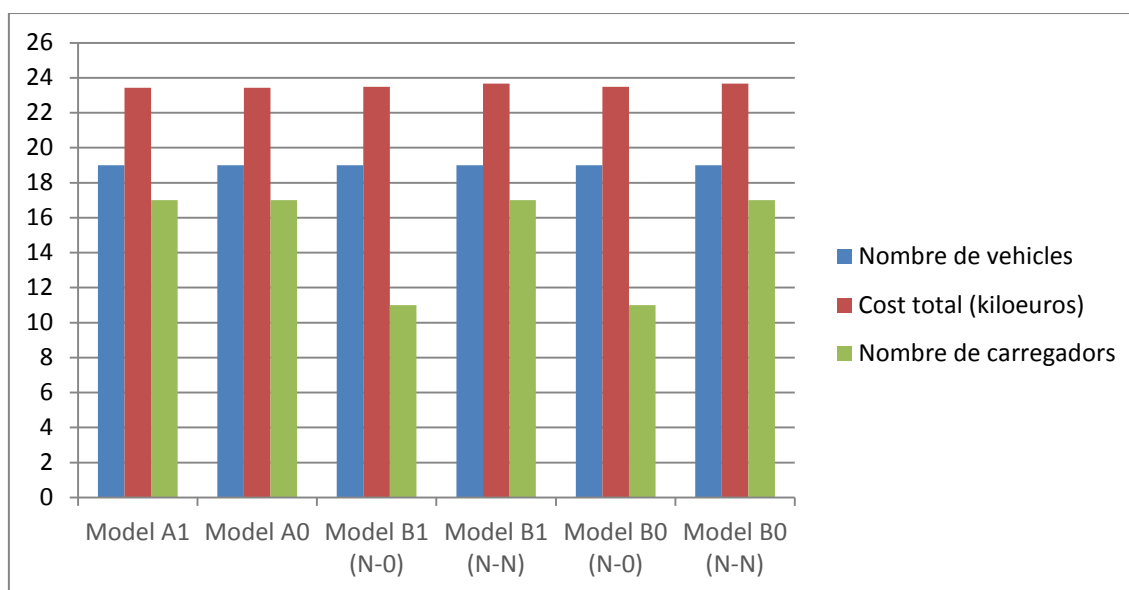


Figura 36: Comparativa dels resultats dels diferents models de recàrrega

Font: Elaboració pròpia

7.2.2. Anàlisi de sensibilitat de les diferents capacitats de les bateries per el model A

Com en el cas anterior, la distància fins a cotxera és una de les variables més determinants en aquest model. En aquest cas, aquesta distància l_g és igual a 9,112 km.

De la mateixa manera que abans, es dividirà el model A en dos, model A1 i model A0, en el que els vehicles poden ser introduïts en servei abans que s'esgotin les bateries o no, respectivament.

Podem observar que, pels dos casos, a mida que la capacitat de les bateries augmenta, el nombre de vehicles necessaris disminueix fins al mínim de busos necessaris per servir en el interval 3, que són 19 busos. En el punt on es torna constant aquest valor és quan la bateria passa a ser de 275 kWh.

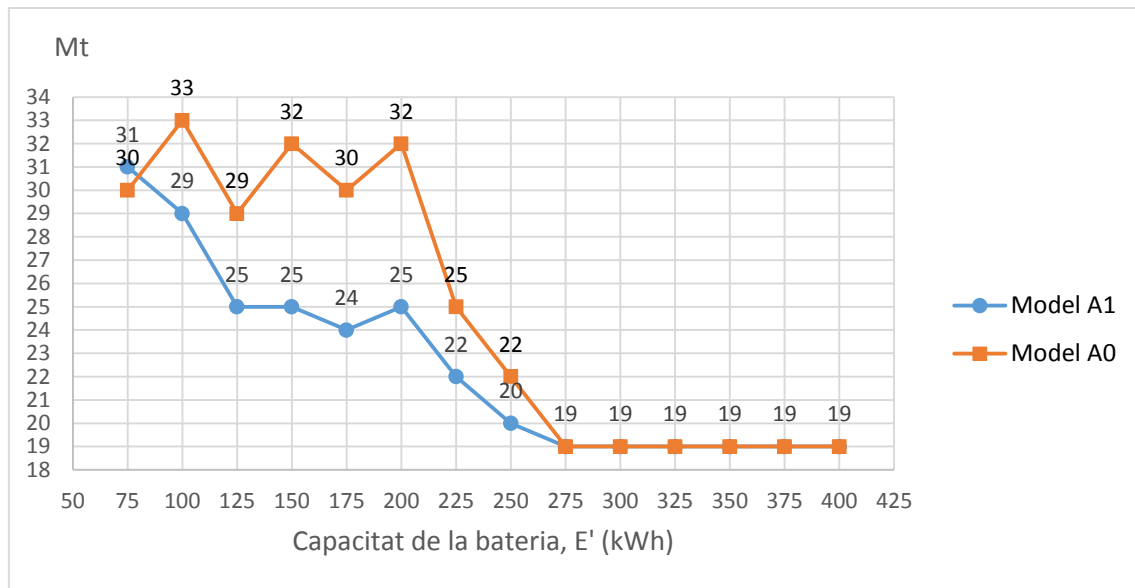


Figura 37: Mida de la flota pels diferents valors de bateries pels models A1 i A0

Font: Elaboració pròpia

El cost oscil·la d'una manera semblant al nombre de busos, ja que la mida de la flota té un enorme pes dins dels costos. D'igual manera que abans, podem trobar un mínim dels costos al punt on les bateries tenen una capacitat de 275 kWh. A partir d'aquest punt, els costos augmenten de manera progressiva, això es degut a que el nombre de busos és el mínim que es pot tenir, i a més capacitat a les bateries més cost, és a dir, que s'estan sobre capacitant els busos.

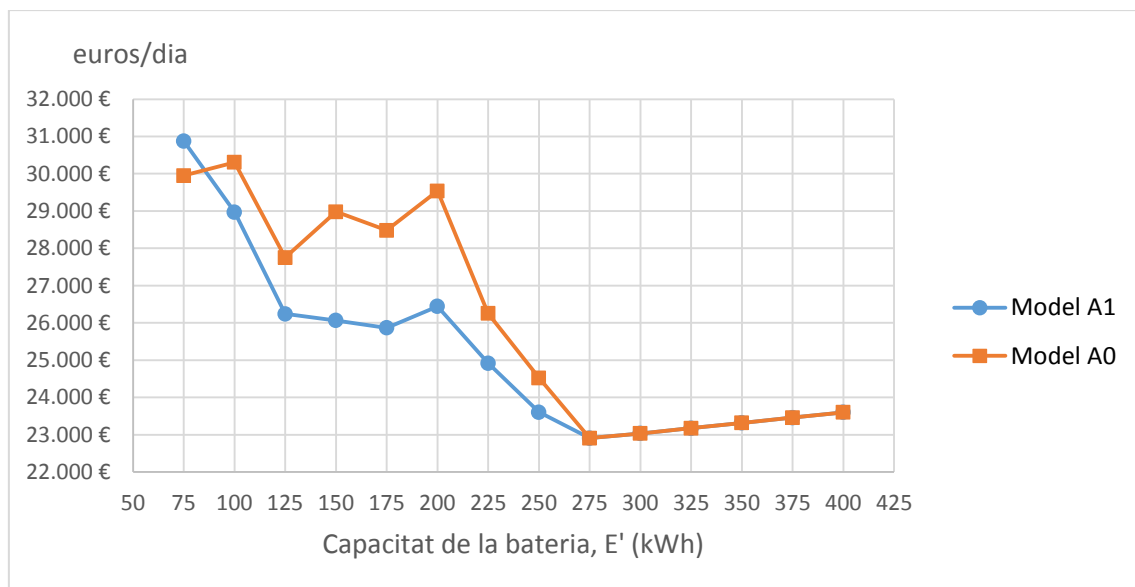


Figura 38: Costos totals dels diferents models A

Font: Elaboració pròpia

D'aquesta manera, podem concloure, que la capacitat òptima, en quan a cost i a nombre de vehicles, pels dos models, està en 275 kWh. El nombre de carregadors serà de 14 a cotxera.

La subdivisió dels costos per aquests dos models, i unes bateries de 275 kWh estan resumits a la següent taula. En aquesta xarxa i aquestes bateries, podem observar, com no afecta el tipus de model, ja que els costos són exactament els mateixos.

Taula 29: Resultats dels costos dels models A1 i A0

	Model A1	Model A0
ZM (€/dia)	18.810,8 €	18.810,8 €
ZV (€/dia)	2.274,2 €	2.274,2 €
ZC (€/dia)	274,4 €	274,4 €
Zbat (€/dia)	1.548,7 €	1.548,7 €
Ztot (€/dia)	22.908,1 €	22.908,1 €

7.2.3. Anàlisi de sensibilitat de les diferents capacitats de les bateries per el model B

El model B correspon al *opportunity charging*, recàrrega en carrer i a cotxera. Igual que en el model A, dividirem aquest en dos grups, model B1 i B0. El primer serà permeten saltar-se una operació de càrrega en un cicle, i el segon serà sense permetre-ho. En cada cas, tindrem dues configuracions diferents, N-0 i N-N, que vol dir, si tenim estació de càrrega a la última parada o no. Aplicarem el model de la mateixa manera que amb anterioritat, buscant el valor òptim de les bateries.

Pel primer model, B1, podem veure com hi ha una gran diferencia entre les dues configuracions, això es degut a que una de les estacions de càrrega està situada a una gran distancia de la parada, és a dir, que els vehicles han de recorre molts kilòmetres per poder carregar-se. Això provoca que per la configuració N-N, el nombre de vehicles sigui molt elevat, i es redueixi a mida que les bateries augmenten la seva capacitat.

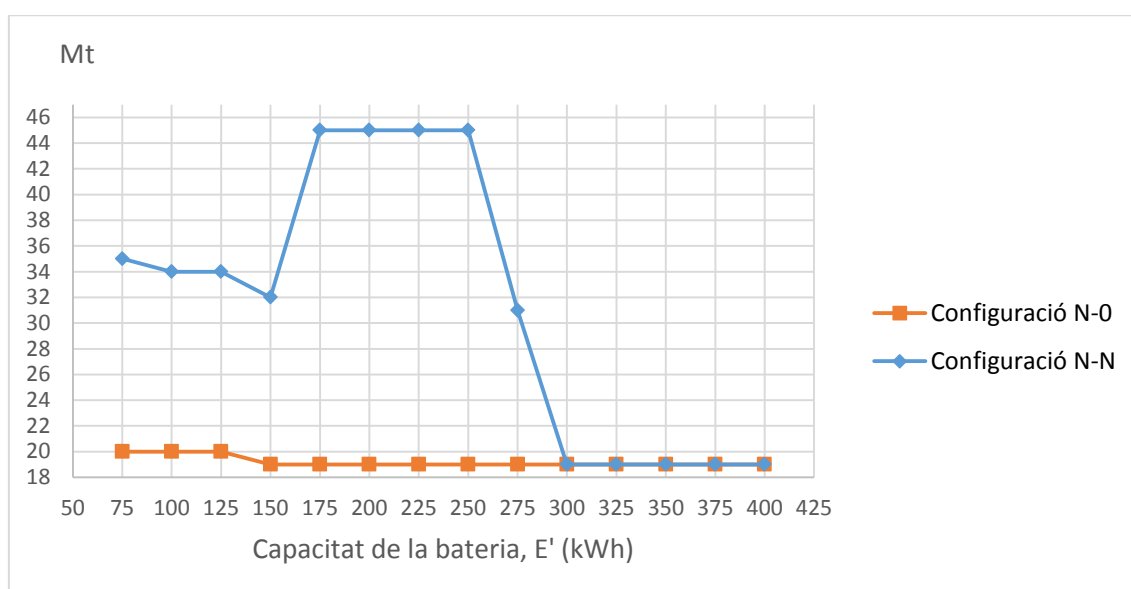


Figura 39: Mida de la flota per les diferents configuracions del model B1

Font: Elaboració pròpia

D'una manera semblant seran els costos. Ja que a més vehicles més cost. Com en el cas de la línia H16, tenim que per aquest model, el nombre de busos és molt baix, ja que el fet de carregar-los durant el trajecte, fa que puguem tenir un nombre de busos semblant al màxim necessaris. El costos estan distribuïts de la següent manera.

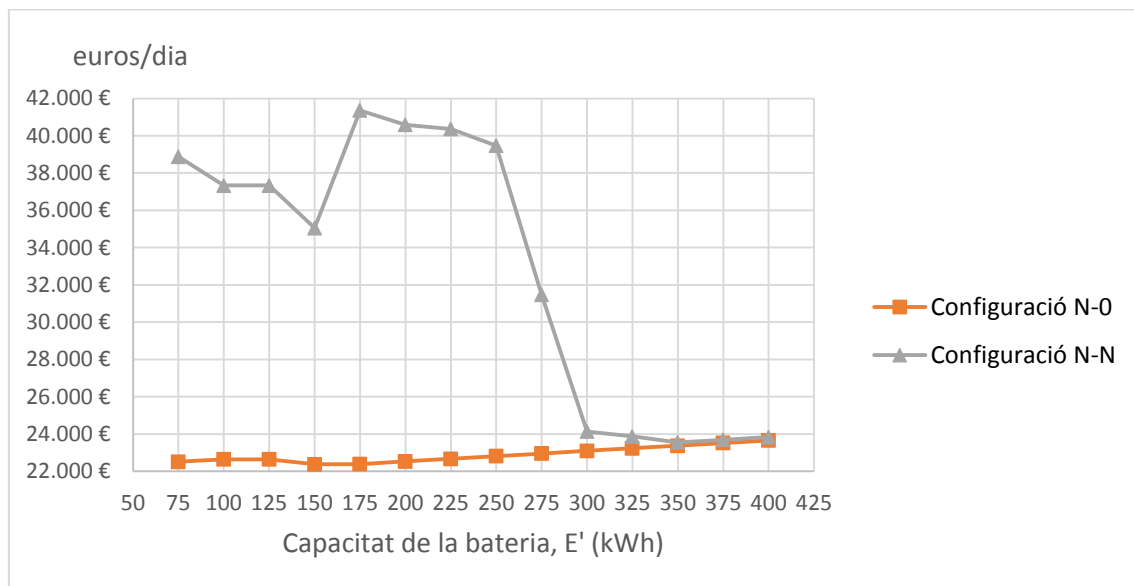


Figura 40: Cost total de les diferents configuracions del model B1, en funció de la capacitat de la bateria

Font: Elaboració pròpia

El valor òptim, serà quan les bateries tinguin una capacitat de 75 kWh.

Pel que fa al segon model, B0, obtenim uns resultats diferents al cas anterior. El nombre de vehicles necessàries per les dues configuracions dins d'aquest model es constant, independentment de les bateries. Per la configuració N-0 obtenim un nombre de busos de 20 i per l'altre, de 35. Això provoca que els costos, siguin bastant semblants entre si, i el que canviï sigui el preu de les bateries.

Igual que en el model B1, el valor òptim està en 75 kWh.

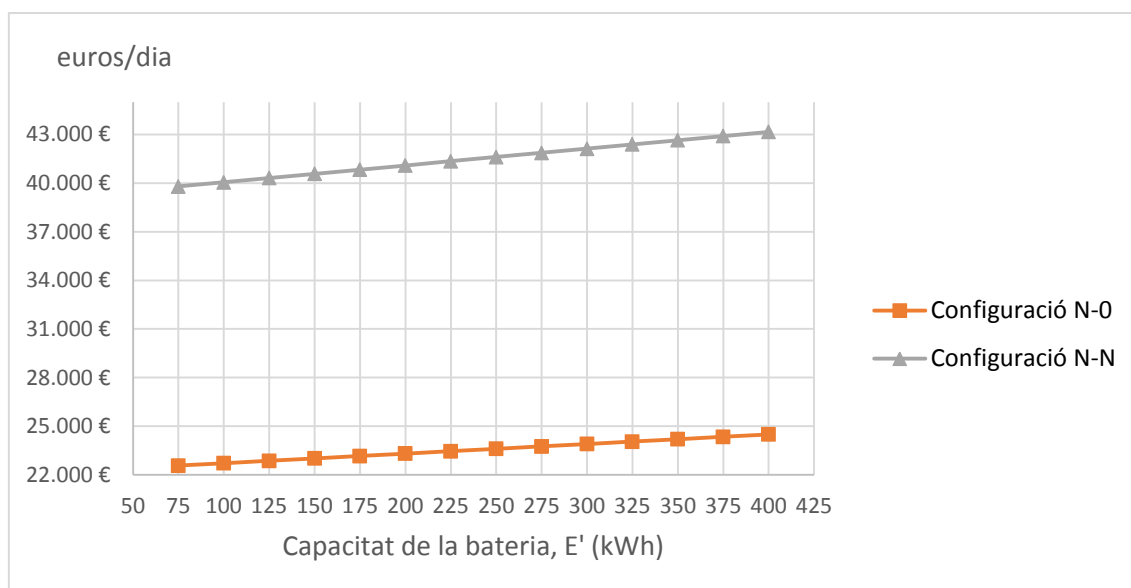


Figura 41: Cost total de les diferents configuracions del model B0, en funció de la capacitat de la bateria

Font: Elaboració pròpia

Per els dos models, la configuració òptima és N-0, això es degut a que una estació de càrrega esta situada molt lluny, i això provoca que només sigui competitiu recarregar els busos a un final de trajecte, i no als dos.

Taula 280: Resultats dels costos dels models B1 i B0 òptims

	Cas (1)	Cas (0)
	Configuració N-0	Configuració N-0
ZM (€/dia)	19.528,6 €	19.604,1 €
ZV (€/dia)	2.288,1 €	2.288,1 €
ZC (€/dia)	254,0 €	234,4 €
Zbat (€/dia)	444,6 €	444,6 €
Ztot (€/dia)	22.515,3 €	22.571,1 €

Podem observar que dels dos models, el òptim és el (1), el qual podem saltar operacions de càrrega. Però el fet que siguin els costos tant similars entre els dos models, vol dir, que no es podran fer gaires salts d'operacions de càrrega.

7.2.4. Xarxa de bus dièsel

Per últim, estudiarem els costos de operar aquesta línia amb busos dièsel. Aquest tipus de bus funciona com el model A, els dipòsits dels busos s'emplenen a cotxera. Per realitzar els càlculs, s'han d'ajustar uns paràmetres per simular un bus dièsel.

Els paràmetres energètics que s'han d'ajustar són el factor de consum energètic, que serà 0,8, i la capacitat del dipòsit, que passarà a ser de 700. Els paràmetres dels costos estan resumits a la taula 22.

Com en el cas de la línia H16, el nombre de busos que obtenim és el màxim necessari a una franja horària, és a dir, 19 busos. Això implica que els vehicles tenen suficient autonomia per cobrir el servei durant tota la franges horàries i que hi ha temps suficient per carregar els vehicles. El cost total és una mica inferior a totes les xarxes elèctriques i està subdividit de la següent manera.

Taula 291: Resultats dels costos

ZM (€/dia)	17.844,6 €
ZV (€/dia)	4.491,0 €
ZC (€/dia)	63,5 €
Zbat (€/dia)	0,0 €
Ztot (€/dia)	22.399,1 €

7.2.5. Comparativa

Agafant els costos mínims de cada model amb els seus respectius valors òptims de les bateries, podem observar com encara, el model més competitiu és el dièsel, però amb poca diferència.

Taula 302: Comparativa dels costos dels diferents models

	Model A	Model B	Dièsel
ZM (€/dia)	18.810,8 €	19.528,6 €	17.844,6 €
ZV (€/dia)	2.274,2 €	2.288,1 €	4.491,0 €
ZC (€/dia)	274,4 €	254,0 €	63,5 €
Zbat (€/dia)	1.548,7 €	444,6 €	0,0 €
Ztot (€/dia)	22.908,1 €	22.515,3 €	22.399,1 €

7.2.6. Anàlisi de sensibilitat en relació a la distància del carregador en carrer

Per realitzar aquest anàlisi de sensibilitat, agafarem el valor òptim que s'ha calculat amb anterioritat per cada model, és a dir, 275 kWh pel model A i 75 kWh pel B. Amb aquests valors es realitza un càlcul suposant que es pot col·locar una estació de recàrrega en carrer a 0 km de distància fins a 4,5 km.

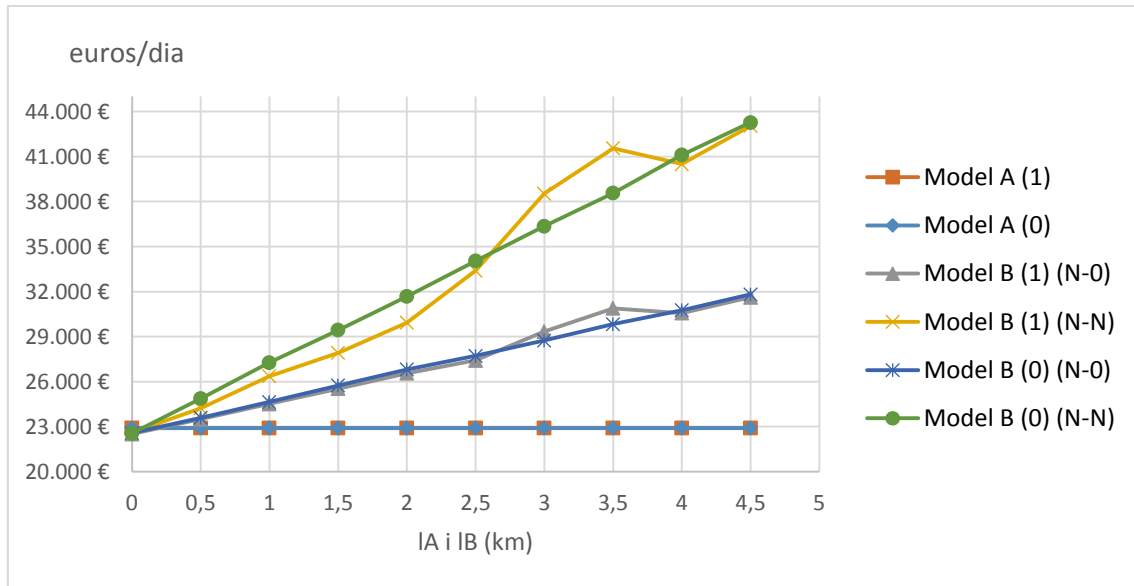


Figura 42: Anàlisi de sensibilitat del costos en funció de les distàncies l_A i l_B

Font: Elaboració pròpia

En el gràfic, es pot observar que en l'únic moment on és més econòmic aplicar el model B sobre el model A és quan l'estació està situada a la mateixa parada del recorregut del bus. Un cop la distància augmenta, els models A es mantenen constants, però els models B augmenten de preu d'una forma molt elevada.

Dins dels models B, la configuració que surt més econòmica és la N-0, ja que no s'ha de fer tanta inversió en infraestructura i els busos no han de recórrer les dues distàncies l_A i l_B per recarregar-se, sinó que només una.

7.2.7. Anàlisi de sensibilitat de la reducció del preu d'adquisició dels vehicles elèctrics

En aquest apartat, com en el cas anterior, es realitzarà l'estudi de quin tant per cent s'hauria de reduir el cost d'adquisició i per tant el cost d'amortització dels vehicles elèctrics. Aquest cost fa variar el cost c_{t2} i per tant el cost total disminuirà.

S'agafaran els valors òptims trobats amb anterioritat per cada model. Pel model A1, el valor òptim de la capacitat de la bateria és de 275kWh i pel model B1, del qual es realitzarà amb la configuració N-0, el valor de la bateria es 75 kWh.

En el gràfic a continuació, podem veure que pel cas del model B1, reduint el cost un 10%, el bus elèctric és competitiu contra el dièsel. En canvi pel model A1, el cost s'haurà de reduir un 25% per poder ser competitiu.

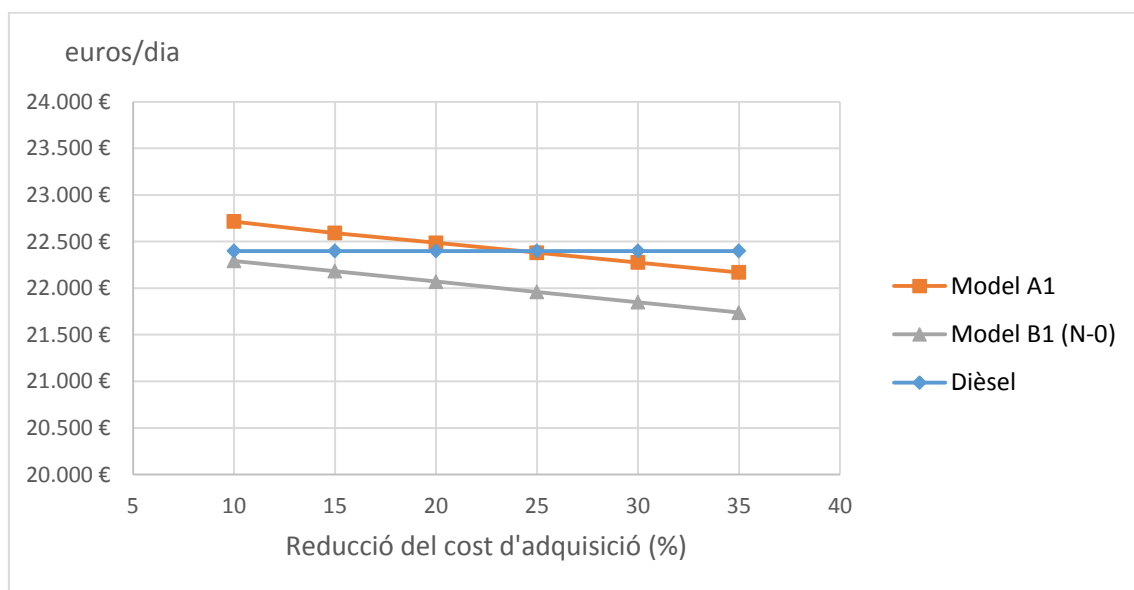


Figura 43: Anàlisi de sensibilitat dels costos en funció de la reducció del preu d'adquisició

Font: Elaboració pròpia

8. CONCLUSIONS

Aquest últim capítol exposa les conclusions extrems de tot l'estudi i anàlisi realitzat sobre els diferents models de recàrrega i sobre les diferents xarxes de autobús.

Les bateries són l'element principal d'aquests tipus d'autobusos elèctrics i, ara per ara, és una tecnologia en procés de desenvolupament per poder optimitzar el rendiment i la vida útil. Però, és pot dir, que la bateria que s'ha d'utilitzar és la d'ió liti. Un dels punts principals d'estudi, és la grandària de les bateries, ja que depenent de l'esquema de xarxa s'haurà d'instal·lar de més grans o més petites.

El sistema de recàrrega ràpida òptim, per carregar els vehicles al carrer, és el pantògraf ascendent. Encara que sigui més car, ja que s'ha d'instal·lar a tots els autobusos, és el més eficient, ja que si es queda fora de servei un, només afecta a l'autobús que el porta. En canvi el pantògraf descendent és més barat, però si es queda fora de servei deixa de recarregar a tots els autobusos.

Actualment, el vehicle elèctric implica que el cost total sigui més elevat que els vehicles ICE. Però en aquest treball s'ha realitzat un anàlisi dels costos només tenint en compte el cost de capital d'inversió i els costos operacionals, i no s'ha tingut en compte els costos ambientals, d'emissions, alhora de fer el càlcul dels ICE. Si es realitza el càlcul incloent aquests costos d'emissions, els costos dels vehicles elèctrics, probablement, no estarien per sobre dels ICE.

Encara que en els casos estudiats, la diferència del cost entre els ICE i els models elèctrics no sigui molt elevada, s'està estudiant dos línies independents i en aquests casos pot ser que la diferència sigui baixa. Però si es realitza un estudi, prenent totes les línies de Barcelona i calculant per cada línia els costos, probablement la diferència seria major.

Un dels problemes principal dels vehicles elèctrics, és que s'ha de dissenyar cada bus per una línia específica, és a dir, que no es pot posar en servei un autobús de la línia H16 a la V13, ja sigui per què no té capacitat suficient per recorre la línia durant el servei o per què té massa capacitat, per lo tant, es sobredimensiona, i l'operador perd diners. Això provoca que es perdi molta flexibilitat.

El model de recàrrega B és el més competitiu, sempre que la distància fins a les estacions de càrrega ($l_A = l_B = 0$). Aquest, $l_A = l_B = 0$, és un cas ideal, on es poden col·locar les estacions de càrrega a les mateixes últimes parades, però en un esquema de ciutat, això, és bastant complicat, ja que no a tot arreu es poden instal·lar aquestes infraestructures. La opció B1 és la òptima, ja que poder saltar-se operacions de recàrrega innecessàries, redueix els costos.

Dins d'aquest model B, la configuració més efectiva és N-0, sempre i quant la capacitat de la bateria garanteixi que pugui complir un cicle complet de servei. La diferència dels costos entre aquestes dos possibles configuracions del servei està entre el 40 i 50 %, a favor de la configuració N-0.

En relació a la disponibilitat de l'espai urbà, en els casos en que, per poder operar amb el model B, es necessiti més d'una plataforma de càrrega al carrer, és molt possible que en els llocs on s'hagi de construir aquestes infraestructures de recàrrega no sigui possible per què no

hi hagi espai. Això pot afectar a la regularitat del servei, per què alhora d'operar el servei, si hi ha menys estacions de recàrrega que la òptima, els autobusos hauran d'esperar per poder ser carregats, per tant es poden crear petites retencions.

El model A, serà més eficient que el model B quan aquest no es pugui operar amb les condicions adients. Pel cas de la H16, quan la distància l_A i l_B sigui superior a 3 km i per la V13, quan aquesta distància sigui superior a 0,5 km.

Dins d'aquest model A, l'opció A1 serà l'òptima, ja que redueix els costos en un 4% respecte al model A0. A més a més, poder recarregar els vehicles abans que s'esgotin les seves bateries, operacionalment fa que els autobusos estiguin recarregats abans i en el cas que hi hagi una necessitat, poden tornar al servei abans.

El model B, encara que és més econòmic, serà complicat d'adaptar a un esquema de ciutat com Barcelona, ja que no a tot arreu es podran instal·lar les estacions de recàrrega necessàries. Per tant, a les grans ciutats, el model que provablement predomini, serà el model A, amb la recàrrega a cotxera.

9. FUTURES VIES D'INVESTIGACIÓ

En aquest apartat es donaran possibles vies d'investigació del treball.

Les primeres vies d'investigació van relacionades amb les tecnologies dels autobusos elèctrics, on hi ha un gran camp de recerca. Primerament, es pot fer un estudi a fons de les bateries, del funcionament, de la composició, de la forma, etc... Així com del seu temps de vida, i desenvolupar algun procés o estructura que permeti allargar aquests temps útil.

També es poden desenvolupar les tecnologies de recàrrega dels autobusos e internar minimitzar el temps de carga, per que sigui el més òptim possible.

Una altre via d'investigació és l'estudi de l'acceptació social a aquestes noves tecnologies i tipus de xarxa, mitjançant enquestes i qüestionaris. I estudiar, també, els inconvenients o avantatges que suposen aquests nous tipus de xarxa per els conductors dels autobusos.

Per últim, es pot fer un estudi dels diferents models a aplicar a cada línia d'una xarxa completa de bus, no nomes de dues línies, tenint en compte l'espai urbà, la localització i la capacitat de les cotxeres. D'aquesta manera es realitzaria un estudi real de la viabilitat tècnica i econòmica de l'aplicació de autobusos elèctrics a una ciutat.

10. REFERÈNCIES

- «Trolebús | Qué es, características, partes, cómo funciona, para qué sirve».
<https://www.euston96.com/trolebus/> (7 agost 2019).
- «RED DE TROLEBUSES DE BARCELONA.»
<http://www.autobusesbcn.es/misc/trolebus.html> (7 agost 2019).
- Zeeus, Project. 2018. «Design of battery systems for electric buses».
- Vilppo, Olli, i Joni Markkula. 2015. «Feasibility of electric buses in public transport».
World Electric Vehicle Journal 7(3): 357-65.
- «High Performance Batteries | AKASOL - Battery Systems».
<https://www.akasol.com/de/> (28 juliol 2019).
- «The European electric bus market is charging ahead, but how will it develop? | McKinsey».
<https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-european-electric-bus-market-is-charging-ahead-but-how-will-it-develop> (29 juliol 2019).
- «ie bus - Irizar e-mobility».
<https://www.irizar-emobility.com/soluciones-y-servicios/vehiculos/ie-bus/> (23 agost 2019).
- «Solaris Bus Ibérica, S.L.».
<https://www.solarisbus.com/> (23 agost 2019).
- «BYD Eléctricos».
<http://bydelectricos.com/productos/2/buses> (24 agost 2019).
- Prof, Assoc, i Nguyen Tuyet. 2003. «Training Material». 1(3).
- Estrada, M., Mensión, J., Salicrú, M. and H. Badia (2019). «Charging operations in battery electric bus systems considering the fleet size variability along the service. Working paper. Barcelona Innovative Transport.» Universitat Politècnica de Catalunya.
- B.Y. Zhou, Y. Wu, B. Zhou, R.J. Wang, W.W. Ke, S.J. Zhang, J.M. Hao, «Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions», *Energy* 96(2016) 603–613.
- J. Miles, S. Potter, «Developing a viable electric bus service: the Milton Keynes demonstration project», *Res. Transp. Econ.* 48 (2014) 357–363.
- «IEA, 2017». *Global EV Outlook 2017*. Paris.
- Li, J.Q., 2014. «Transit bus scheduling with limited energy». *Transport. Sci.* 48, 521–539.

11. ANNEX

Taula A 1: Procés iteratiu per avaluar la variable A^1

```

For  $i=N$  to 3 Step -1
  For  $k=A^0(i)$  to 0 Step -1
     $A^1(i) = k$ 
     $M_{INV,D}(i-1) = M_R(i) - A^1(i) + M_{INV,D}(i)$ 
    If  $M_{INV,D}(i-1) \geq 0$  then  $k=-1$ 
  Next
Next

```

Taula A 2: Algorisme $INV-N$

```

 $A = A^1(k)$ 
For  $i=1$  to  $N$ 
  For  $j=1$  to  $N$ 
    If  $Ndep(i,j) = k$  and  $M_{DEP}(i,j) > 0$  and  $M_{DEP}(i,j) \geq A$  then
       $M_{INV,N}(j) = M_{INV,N}(j) + M_{DEP}(i,j) - A$ 
       $M_{DEP,D}(i,j) = A$ 
       $A = 0$ 
    Endif
    If  $Ndep(i,j) = k$  and  $M_{DEP}(i,j) > 0$  and  $M_{DEP}(i,j) < A$  then
       $M_{DEP,D}(i,j) = M_{DEP}(i,j)$ 
       $A = A - M_{DEP}(i,j)$ 
    Endif
  Next
Next

```